



**Escola de Camins**

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## TESI DE MÀSTER

**Màster**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Títol**

**Estudio del actual cambio climático en Cataluña a  
través del análisis de índices climáticos extremos**

**Autor/a**

**Dolores Guerreiro Pérez**

**Tutor/a**

**María Gonçalves Ageitos y Jose María Baldasano**

**Intensificació**

**Data**

**07/02/2014**

# ÍNDICE

Índice de Figuras .....	2
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>12</b>
3.1    MODELOS USADOS .....	12
3.1.1    Sistema de modelización .....	12
3.1.2    Modelo Regional: WRF-ARW .....	13
3.1.3    Re-análisis: ERA40.....	14
3.1.4    Modelo global: ECHAM5/MPI-OM .....	15
3.1.5    Proyecto ENSEMBLES.....	18
3.2    OBSERVACIONES .....	20
3.2.1    E-OBS.....	20
3.2.2    SPAIN02.....	22
3.3    DOMINIOS .....	23
3.4    ÍNDICES CLIMÁTICOS.....	24
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
4.1    EVALUACIÓN DEL MODELO PARA EL PERÍODO DE CONTROL (1971-2000) .....	26
4.1.1    Evaluación de índices de temperatura.....	26
4.1.2    Evaluación de índices de precipitación .....	35
4.1.3    Síntesis de la evaluación del modelo para el período de control .....	44
4.2    PROYECCIONES DE LOS ÍNDICES CLIMÁTICOS PARA 2001-2050.....	45
4.2.1    Proyección de índices de temperatura.....	46
4.2.2    Proyección de índices de precipitación.....	56
4.2.3    Síntesis de la proyección de los índices climáticos.....	66
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>71</b>

## Índice de Figuras

FIGURA 1. CAMBIOS OBSERVADOS EN (A) TEMPERATURA DEL AIRE, (B) NIVEL DEL MAR Y (C) MANTO DE NIEVE EN EL HEMISFERIO NORTE EN PRIMAVERA. ....	5
FIGURA 2. ESQUEMA DE (A) LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL BALANCE RADIATIVO Y (B) LOS COMPONENTES DEL SISTEMA CLIMÁTICO.....	7
FIGURA 3. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA TÉCNICA DE REGIONALIZACIÓN. ....	8
FIGURA 4. OROGRAFÍA DE LA REGIÓN DE ESTUDIO. ....	10
FIGURA 5. DISTRIBUCIÓN DE RADIO-SONDAJES EN (A) 1958 (B) 1979 Y (C) 2001. (FUENTE: UPPALA, 2005).....	15
FIGURA 6. PROYECCIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE CO <sub>2</sub> (GTC/AÑO) GLOBALES EN LOS ESCENARIOS A1B, A1FI Y A1T. ....	18
FIGURA 7. RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL E-OBS: (A) PRECIPITACIÓN Y (B) TEMPERATURA. ....	21
FIGURA 8. RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS DEL SPAIN02. (A) PRECIPITACIÓN Y (B) TEMPERATURA ....	22
FIGURA 9. DOMINIOS DE (A) LOS MODELOS DEL PROYECTO ENSEMBLES. (B) DOMINIO DEL WRF-ARW DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	23
FIGURA 10. ANOMALÍAS PERCENTIL 5 DE LA TEMPERATURA MÍNIMA DIARIA (05PTN) PARA EL PERÍODO DE CONTROL. ....	27
FIGURA 11. ANOMALÍAS DEL PERCENTIL 95 DE LA TEMPERATURA MÁXIMA (95PTX) PARA EL PERÍODO DE CONTROL.....	28
FIGURA 12. ANOMALÍAS DEL RANGO DE TEMPERATURAS EXTREMAS (ETR) PARA EL PERÍODO DE CONTROL.....	29
FIGURA 13. ANOMALÍAS DEL ÍNDICE DE DURACIÓN DE OLAS DE CALOR (HWDI) PARA EL PERÍODO DE CONTROL.....	30
FIGURA 14. ANOMALÍAS DE LOS DÍAS DE HELADA (FD) PARA EL PERÍODO DE CONTROL .....	31
FIGURA 15. DÍAS DE HELADA POR ESTACIONES PARA (A) SPAIN02, (B) E-OBS Y (C) WRF-ERA40, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON).....	32
FIGURA 16. ANOMALÍAS DE LAS NOCHES TROPICALES (TR) PARA EL PERÍODO DE CONTROL ..	33
FIGURA 17. NOCHES TROPICALES POR ESTACIONES PARA (A) SPAIN02, (B) E-OBS Y (C) WRF-ERA40, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON).....	34
FIGURA 18. ANOMALÍAS DEL MÁXIMO DE PRECIPITACIÓN EN 1 DÍA (RX1DAY) EN EL PERÍODO DE CONTROL.....	35
FIGURA 19. ANOMALÍAS DE LOS DÍAS DE PRECIPITACIÓN ABUNDANTE (R20MM) EN EL PERÍODO DE CONTROL.....	36
FIGURA 20. ANOMALÍAS DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL EN LOS DÍAS MUY LLUVIOSOS (R95PTOT) EN EL PERÍODO DE CONTROL .....	37
FIGURA 21. ANOMALÍAS DE LA LONGITUD DE LA RACHA HÚMEDA (CWD) PARA EL PERÍODO DE CONTROL.....	38
FIGURA 22. LONGITUD DE LA RACHA HÚMEDA POR ESTACIONES SEGÚN (A) SPAIN02, (B) E-OBS Y (C) WRF-ERA40, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) ..	39
FIGURA 23. ANOMALÍAS DE LA LONGITUD DE LA RACHA SECA (CDD) PARA EL PERÍODO DE CONTROL.....	41

FIGURA 24. LONGITUD DE LA RACHA SECA POR ESTACIONES SEGÚN (A) SPAIN02, (B) E-OBS Y (C) WRF-ERA40, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) ...	42
FIGURA 25. ANOMALÍAS DE 05PTN ENTRE 1971-2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	46
FIGURA 26. ANOMALÍAS DEL PERCENTIL 95 DE LA TEMPERATURA MÁXIMA ENTRE 1971 – 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	47
FIGURA 27. ANOMALÍAS DEL RANGO DE TEMPERATURAS EXTREMAS (ETR) ENTRE 1971 -2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	48
FIGURA 28. ANOMALÍAS DEL ÍNDICE DE DURACIÓN DE OLAS DE CALOR (HWDI) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	49
FIGURA 29. ANOMALÍAS DE DÍAS DE HELADA (FD) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	50
FIGURA 30. (A) DÍAS DE HELADA SIMULADOS POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3 ENTRE 1971-2000 EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA), OTOÑO (SON) Y (B) PROYECCIONES DE DÍAS DE HELADA ENTRE 2021–2050 VS 1971-2000 POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) .....	51
FIGURA 31. ANOMALÍAS DE LAS NOCHES TROPICALES (TN) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	53
FIGURA 32. (A) NOCHES TROPICALES SIMULADAS POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3 ENTRE 1971-2000, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) Y (B) PROYECCIONES DE NOCHES TROPICALES ENTRE 2021–2050 VS 1971-2000 POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) .....	54
FIGURA 33. ANOMALÍAS DEL MÁXIMO DE PRECIPITACIÓN EN UN DÍA (RX1DAY) ENTRE 1971-2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	56
FIGURA 34. ANOMALÍAS DE LOS DÍAS DE PRECIPITACIÓN ABUNDANTE (R20MM) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	57
FIGURA 35. ANOMALÍAS DE LA PRECIPITACIÓN TOTAL ANUAL EN LOS DÍAS MUY LLUVIOSOS (R95PTOT) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	58
FIGURA 36. ANOMALÍAS DE LA LONGITUD DE LA RACHA HÚMEDA (CWD) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	59
FIGURA 37. (A) LONGITUD DE RACHA HÚMEDA POR SIMULADA POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3 ENTRE 1971-2000, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) Y (B) PROYECCIONES DE LA LONGITUD DE LA RACHA HÚMEDA POR ESTACIONES ENTRE 2021-2050 VS 1971-2000 POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3 EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) .....	60
FIGURA 38. ANOMALÍAS DE LA LONGITUD DE LA RACHA SECA (CDD) ENTRE 1971 Y 2050 PARA EL ESCENARIO A1B .....	62
FIGURA 39. (A) LONGITUD DE LA RACHA SECA SIMULADA POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3 ENTRE 1971-2000, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) Y (B) PROYECCIONES DE LA LONGITUD DE LA RACHA SECA ENTRE 2021-2050 VS 1971-2000 REALIZADAS POR WRF-ECHAM5S1 Y WRF-ECHAM5S3, EN INVIERNO (DJF), PRIMAVERA (MAM), VERANO (JJA) Y OTOÑO (SON) .....	63

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis tutores, la Dra. María Gonçalves Ageitos y al Dr. Jose María Baldasano, por guiarme durante la realización de esta tesina. Al profesor Santiago Gassó por ayudarme al principio del proceso.

Al BSC-CNS (Barcelona Supercomputing Center –Centro Nacional de Supercomputación) por permitirme utilizar el supercomputador MareNostrum sin el cual no habría podido llevar a cabo este trabajo.

A la Universidad Politécnica de Cataluña, en especial a la Escuela de Ingeniería de caminos, canales y puertos donde cursé el Máster.

A mi familia y amigos que me han apoyado y animado en los momentos difíciles y en los no tan difíciles.

## 1. INTRODUCCIÓN

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en el quinto informe del grupo de trabajo I ha proyectado numerosos impactos que pueden resultar del actual cambio climático. A nivel continental, regional y en las cuencas oceánicas se han observado numerosos cambios en el clima a largo plazo, de forma que ha cambiado el volumen de las precipitaciones, la salinidad de los océanos, la configuración de los vientos, la temperatura y el hielo en la región ártica, y ha aumentado la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos como sequías, inundaciones, olas de calor o ciclones tropicales, entre otros (OMM, 2007; IPCC, 2013, figura 1). El calentamiento mundial de los últimos 50 años se debe al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) es el principal GEI y sus emisiones son debidas esencialmente al consumo de combustibles fósiles. Las concentraciones de  $\text{CO}_2$  están en continuo aumento, y al término del año 2013 eran de 400 ppm (medidas dadas por el observatorio del Mauna Loa) un 40% por encima de los niveles preindustriales (IPCC, 2013). Aunque las emisiones de GEI se redujesen, el calentamiento antropogénico proseguiría durante siglos. Las proyecciones indican que durante los dos próximos decenios el calentamiento global será de 0.3 a 0.7°C (IPCC, 2013).

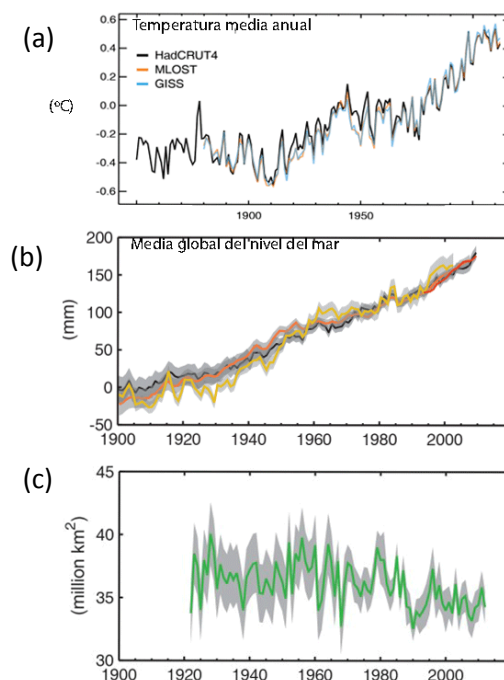


Figura 1. Cambios observados en (a) temperatura del aire, (b) nivel del mar y (c) manto de nieve en el hemisferio norte en primavera.  
(Fuente: IPCC, 2013)

Los gobiernos disponen de múltiples políticas e instrumentos para, por una parte, crear incentivos con el fin de reducir la emisión de los GEI y limitar el continuo aumento de la temperatura, y por otra, para mitigar los efectos del cambio climático en los distintos sectores afectados por el mismo. En la Conferencia de las Partes (COP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, en inglés) que tuvo lugar en Varsovia en diciembre de 2013, se subrayó la necesidad de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de 2°C con respecto a los niveles pre-industriales (UNFCCC, 2013).

Para entender, detectar y predecir la influencia del ser humano en el clima, es necesario entender el sistema que determina el clima terrestre y los procesos que llevan al actual cambio climático. Así, el sistema climático es un sistema interactivo y complejo compuesto por: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, influenciados por varias fuerzas externas, una de las más importantes es el efecto de las actividades humanas en el sistema climático (industria, agricultura, transporte, etc.). Asimismo, el clima de la tierra depende en gran parte de su balance radiativo (figura 2 a), el cual viene dado, principalmente por la radiación solar e infrarroja absorbida y reflejada por los distintos factores que intervienen en ella, como son los aerosoles, los GEI, las cubiertas de hielo y las masas de agua, la vegetación, las nubes, la superficie del suelo o la actividad humana, entre otros (figura 2b).

Así, la radiación solar neta entrante,  $342 \text{ W/m}^2$ , es parcialmente absorbida por la superficie terrestre,  $168 \text{ W/m}^2$ , y por la atmósfera,  $67 \text{ W/m}^2$ . Asimismo, parte de la radiación solar neta es reflejada por las nubes,  $77 \text{ W/m}^2$  y la superficie terrestre,  $30 \text{ W/m}^2$ . Ese calor es devuelto a la atmósfera, parte como calor sensible, pero la mayoría es, más tarde, liberado como calor latente de condensación dentro de la atmósfera,  $78 \text{ W/m}^2$ . El resto es irradiado como radiación térmica procedente de la superficie,  $24 \text{ W/m}^2$ . De la radiación emitida por la superficie terrestre,  $390 \text{ W/m}^2$ , la mayoría es absorbida por la atmósfera o las nubes,  $150 \text{ W/m}^2$ . Además, la radiación infrarroja que se pierde en el espacio,  $235 \text{ W/m}^2$ , procede de las nubes,  $30 \text{ W/m}^2$  y parte de la atmósfera,  $205 \text{ W/m}^2$ . Asimismo, los GEI hacen que gran parte de la radiación infrarroja se quede en la tierra,  $324 \text{ W/m}^2$ , en lugar de perderse en el espacio (Houghton, 2005).

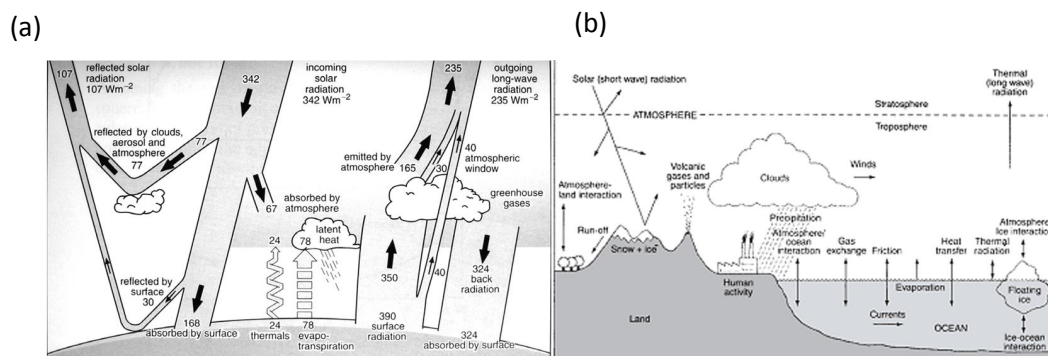


Figura 2. Esquema de (a) los factores que influyen en el balance radiativo y (b) los componentes del sistema climático. (Fuente: Houghton , 2005)

El comportamiento del sistema climático puede ser estudiado mediante modelos climáticos, estos están diseñados para estudiar los procesos y la variabilidad natural del clima, así como, para simular y cuantificar la respuesta climática a actividades humanas. Los Modelos Atmosférico-Oceánicos Climáticos Globales (AOGCMs), son la principal herramienta para simular el cambio climático a gran escala. Con el desarrollo de los sistemas informáticos, la resolución horizontal y la complejidad de los AOGCMs ha aumentado. De tal manera que desde mediados de los años 70 que se desarrollaron los primeros modelos climáticos, se han ido añadiendo cada vez más procesos y mejorando su resolución espacial, así los modelos actuales tienen en cuenta los procesos atmosféricos, oceánicos, los suelos, el ciclo del carbono, los aerosoles sulfatados y no sulfatados, la vegetación y la química atmosférica (IPCC, 2013).

Sin embargo, los AOGCMs usados para realizar proyecciones climáticas tienen, en la actualidad, una resolución horizontal que oscila entre los 100 y 300 km constituyendo una escala demasiado grande para detectar los eventos climáticos que caracterizan a las distintas regiones del mundo (Giorgi, 2008). Por ello, los AOGCMs, no son adecuados para realizar estudios de impacto o para conocer el clima con detalle en una región específica, sino que se necesitan técnicas de regionalización. Uno de los métodos más usados para hacer esto es el uso de un Modelo Climático Regional (RCM) o de área limitada anidado en un modelo global. Esta aproximación permite la implementación de parametrizaciones físicas mucho más detalladas permitiendo una mejor representación de determinados procesos, tales como el efecto de la topografía o las líneas de costa en el forzamiento radiativo de los GEI. De esta manera, los RCMs aseguran una simulación más definida de los eventos climáticos (Goubanova & Li, 2007). Otra de las técnicas usadas es la regionalización empírica, que por medio de la estadística deduce información a pequeña escala, dadas unas condiciones a gran escala. Tanto en la regionalización empírica como en la dinámica se usan métodos estadísticos y los modelos son evaluados con medidas históricas u observaciones (Benestad et al., 2008).



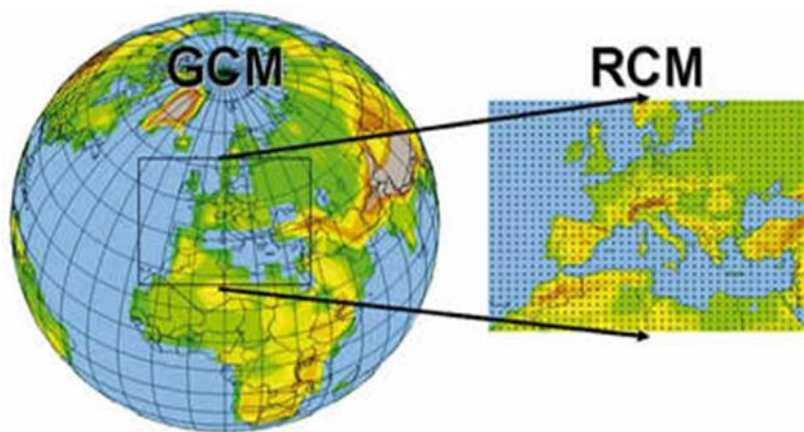


Figura 3. Descripción esquemática de una técnica de regionalización. (Fuente: Giorgi, 2008)

Para poder disponer de un RCM anidado sobre un área de interés, este necesita unas condiciones de contorno laterales, así como unas condiciones iniciales. En el procedimiento de anidación, estas condiciones son facilitadas por las simulaciones del AOGCM correspondiente, o como alternativa, por los campos derivados del análisis a nivel global de las observaciones. Así, el supuesto básico de este enfoque es que el AOGCM simula la respuesta de la circulación global a gran escala, mientras que el Modelo Climático Regional anidado simula el efecto de los forzamientos regionales a escala inferior a la del AOGCM, de manera que, generalmente, los RCM añaden información regional de pequeña escala a la señal climática de gran escala (Giorgi, 2008).

El uso de estas técnicas de regionalización ha ido en aumento, de tal manera que en Europa se han llevado a cabo una serie de proyectos a lo largo de las dos últimas décadas financiados por la Unión Europea (Fernández et al., 2012). En este sentido cabe destacar el proyecto ENSEMBLES (<http://www.ensembles-eu.org/>), un proyecto europeo de regionalización desarrollado entre 2004 y 2009, coordinado por el *Met Office Hadley Centre* donde se utilizaron multitud de modelos regionales aplicados a una resolución de 25 km, con el fin de analizar los efectos del cambio climático en diferentes escenarios y regiones europeas (Van der Linden et al., 2009), y el proyecto CORDEX ([http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF\\_RCD\\_CORDEX.html](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_RCD_CORDEX.html)), una iniciativa internacional financiada por el Programa Mundial de Investigación sobre el Clima (WRCP), que promueve la generación y mejora de simulaciones regionales, a 0.11° de resolución, sobre una serie de regiones estándar abarcando la mayor parte de las zonas terrestres del mundo (Giorgi et al., 2009). A nivel español destaca el proyecto de regionalización dinámica ESCENA, que, siguiendo la metodología del proyecto ENSEMBLES, aplica diferentes modelos regionales sobre

la Península Ibérica, a una resolución espacial de 25 km, con el objetivo principal de obtener diferentes escenarios de cambio climático sobre España (Domínguez et al., 2013).

El IPCC en su cuarto informe, y basándose en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE) de Nakićenović et al., (2000), establece unas directrices con las que se definen diferentes tendencias de evolución relacionadas con la concentración de las emisiones antropogénicas de GEI en función de variables tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico, el cambio tecnológico y la energía. Desde esta perspectiva se definen varios escenarios futuro de los cuáles muchos de los proyectos antes nombrados, como ENSEMBLES o ESCENA , se centran en tres (A1B , B1y A2) abarcando un amplio rango de posibilidades basándose en líneas alternativas de desarrollo futuro y, por tanto, de evolución de GEI. Así, el escenario B1, es el escenario optimista con una evolución esperada de GEI relativamente baja, al A1B, se le puede considerar como escenario intermedio, aunque supone un nivel de emisiones mayor que el anterior pero con un uso equilibrado de fuentes de energía fósiles y alternativas, y el A2 es el escenario pesimista, ya que es el más intensivo en términos de emisiones de GEI.

La zona de estudio (figura 4) constituye una región con una gran complejidad de análisis, por una parte debido a su ubicación en un entorno Mediterráneo, Cataluña, el norte de Valencia y Baleares (Norroeste de la cuenca Mediterránea), constituyen una región particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático. Por otro lado, su compleja orografía implica una alta variabilidad climática, puesto que se encuentra rodeada por dos cadenas montañosas, al norte los Pirineos y al sur el Sistema Ibérico. Las cadenas montañosas junto con el Mar Mediterráneo, hacen que el clima de esta región varíe de manera considerable tanto en el tiempo como en el espacio, y, como consecuencia, los extremos climáticos presenten características muy locales (Gonçalves et al., 2013; Barrera-Escoda et al., 2013).



Figura 4. Orografía de la región de estudio. (Fuente: IGME, 2010)

La ocurrencia de eventos climáticos extremos, tales como sequías, olas de calor o precipitación extrema conllevan riesgos para el bienestar humano y natural y tienen gran importancia en el clima. Ben-Gai et al. (1998) analizaron varias estaciones situadas en múltiples ciudades Mediterráneas, en el período entre 1951 y 1995, y concluyeron que los eventos de precipitación torrencial habían aumentado, aunque la precipitación media había disminuido. Del mismo modo, Baldi et al. (2006) estudiaron las olas de calor en la región Mediterránea analizando un total de 53 veranos, desde 1951 al 2003. Concluyeron que el número de olas de calor había aumentado dramáticamente en los últimos 10 años, y que en el mismo período la duración de las olas de calor estaban contribuyendo a la ocurrencia de eventos extremamente calurosos.

Asimismo, Cardoso et al. (2012) analizaron la precipitación media y extrema en la Península Ibérica, esta última mediante el cálculo de diversos índices de precipitación, tales como los días de precipitación abundante, el máximo de precipitación diaria o la longitud de la racha seca entre otros, en el período entre 1989 y 2009. Entre los resultados concluyeron que la frecuencia en la precipitación había aumentado, aunque los episodios de precipitación abundante se veían subestimados. En cuanto a la precipitación estacional, el verano constituía la estación con menos precipitación registrada en toda la península, y la primavera y el otoño las dos estaciones con valores de precipitación máxima, especialmente en la región Catalana. Observando los estudios, anteriormente referidos y dados los efectos que pueden causar los eventos climáticos extremos, sería interesante analizar el clima extremo y proyectar su evolución a través de diferentes índices climáticos.

En este sentido, Sánchez et al. (2004) hicieron un estudio enfocado a proyectar los cambios en los eventos climáticos extremos en la región Mediterránea, usando el período de control

comprendido entre 1960-1990 y comparando los resultados dados en el mismo con las proyecciones, entre 2070 y 2100, del escenario de emisión A2. Como modelo regional usaron la versión climática del modelo atmosférico de área limitada PROMES con una resolución horizontal de 50 km. Concluyeron que tanto las temperaturas máximas como las mínimas irían en aumento, principalmente las primeras. De tal manera que la ocurrencia de las olas de calor disminuirían, en al menos 10 días, en la mayor parte de la Península Ibérica, especialmente en verano, aunque serían más extremas y las olas de frío aumentarían en verano, en al menos 50 días, y disminuirían en primavera resultando un gran contraste entre las olas de calor y de frío. Con respecto a la precipitación, en general se daban cambios muy variables en los episodios de precipitación media extrema, con una tendencia a aumentar en su frecuencia en muchas áreas del Mediterráneo, particularmente en las estaciones húmedas.

Por otra parte, Vicente Serrano et al. (2004) estudiaron los patrones de variación futura de sequía en el Mediterráneo y concluyeron que las zonas del Mediterráneo mostrarían, por lo general, una disminución en la precipitación y un aumento en el número de eventos extremos como sequías e inundaciones. Además los modelos climáticos sugerían, en el futuro, un aumento general de las sequías en el Mediterráneo para el siglo XXI.

La irregularidad en el régimen de precipitación y la alta variabilidad en el clima estacional hacen particularmente interesante el análisis de extremos de temperatura y precipitación en esta region (Domínguez et al., 2013). Además, gracias a los recursos computacionales de que se dispone es posible estudiar la evolución de los eventos climáticos extremos en el Noroeste de la cuenca Mediterránea incrementando la resolución hasta 10 km, de tal manera que a una resolución más alta se pueden captar eventos (noches tropicales, días de helada, longitud de racha seca, longitud de racha húmeda, etc.) con un mayor grado de detalle espacial, que otros modelos cuya resolución es más baja.

## **2. OBJETIVOS**

Los objetivos que se pretenden conseguir en el presente trabajo son:

- Analizar los índices climáticos, de temperatura y precipitación, de las simulaciones realizadas por el modelo regional Advanced Research Weather Research and Forecasting, WRF-ARW (Skamarock et al., 2008), forzado por el modelo global ECHAM5/MPI-OM (Marsland et al., 2003; Roeckner et al., 2003), constituyendo un modelo de clima regional aplicado a una resolución de 10 km y representativo del estado

de la ciencia. Tomando en consideración el escenario intermedio de emisiones, A1B, definido por el IPCC con el fin de estudiar los extremos climáticos en el Noroeste de la cuenca Mediterránea, para el período 2001-2050 respecto del 1971-2000.

- Evaluar la capacidad del sistema de modelización para determinar la variabilidad espacial y temporal de indicadores del clima extremo, mediante la comparación de los resultados de la simulación en el período de control, definido como el período en el cuál se evalúa el modelo simulando eventos ocurridos en este caso entre 1971 y el 2000, con los datos de las observaciones.

### **3. METODOLOGÍA**

A continuación se presenta la metodología que se ha seguido para analizar los extremos climáticos sobre el Noroeste de la cuenca Mediterránea. Primero se define el modelo usado para la regionalización climática sobre la zona de estudio para finales del siglo XX (1971-2000) y la primera mitad del siglo XXI (2001-2050), así como los diferentes modelos del proyecto ENSEMBLES utilizados como referencia para comparar los índices calculados. Seguidamente se describen las bases de datos observacionales para el siglo XX y los dominios sobre los que se aplica el modelo. Posteriormente, se detallan las características del escenario sobre el que se han realizado las proyecciones. Para terminar, se concretan los índices climáticos calculados para definir el comportamiento de los eventos climáticos extremos en la zona de estudio.

Hay que señalar que para llevar a cabo este estudio se han utilizado los resultados de las simulaciones realizadas previamente en Gonçalves et al. 2013. Así, la generación de dichos resultados supuso la ejecución de 330 años de simulación. Ello ha sido posible gracias a la capacidad computacional del supercomputador MareNostrum, del Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación (<http://www.bsc.es/>), que cuenta con 48896 procesadores con una capacidad de cálculo de 1.1 Petaflops. El tiempo total de cálculo empleado para llevar a cabo las simulaciones equivale a 185 años con un único procesador.

#### **3.1 Modelos usados**

##### **3.1.1 Sistema de modelización**

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado la versión climática del modelo numérico de predicción mesoescalar o de área limitada WRF-ARW desarrollado por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) y que es representativo del estado del arte en modelización meteorológica actualmente.

Para evaluar el comportamiento del modelo, se realiza una simulación de control en el período que va de 1971 al 2000 con el forzamiento del re-análisis ERA-40 (WRF-ERA40 de ahora en adelante) del Centro Europeo de predicción meteorológica a medio plazo (ECMWF, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, Uppala et al., 2005). El objetivo del proceso de evaluación es valorar la habilidad de los modelos para simular el clima presente y pasado (IPCC, 2001). Los modelos climáticos requieren la necesidad de ser evaluados debido a que deben probar su calidad y representación de los diferentes elementos y procesos que afectan al clima, ya que pueden no ser adecuados por diversos motivos (Goose et al., 2008).

Como modelo global climático para proporcionar las condiciones de contorno e iniciales necesarias para las simulaciones regionales, para el período 2001 – 2050, se ha utilizado el modelo ECHAM5/MPI-OM, un modelo de circulación general atmosférico-oceánica desarrollado conjuntamente por el ECMWF y el Instituto de meteorología Max Planck de Hamburgo.

Con respecto a los modelos del proyecto ENSEMBLES permiten, por una parte, analizar las fuentes de incertidumbre, que pueden tener lugar en la modelización, en relación a las parametrizaciones del modelo regional y global. Asimismo, representando los índices climáticos con los resultados de los diferentes modelos, es posible obtener una verificación adicional de los resultados obtenidos por el sistema de modelización.

### **3.1.2 Modelo Regional: WRF-ARW**

El punto de partida del método de regionalización dinámica suele ser un grupo de elementos a gran escala procedentes de modelos globales, ECHAM5-MPIOM, o de re-análisis ERA40. Los primeros se usan para proporcionar las condiciones iniciales y de contorno meteorológicas y superficiales al modelo climático regional anidado. Los segundos, se utilizan principalmente para evaluar el modelo regional y corroborar que sigue la tendencia de las observaciones. El modelo regional no pretende modificar o corregir la circulación, a gran escala, simulada por el modelo global, sino que intenta añadir detalle a la misma (Chun-Fung Lo et al, 2008).

En el presente estudio, WRF-ARW, se ha utilizado para proyectar el clima extremo en el Noroeste de la cuenca Mediterránea. Se ha conseguido una alta resolución usando una malla anidada con una resolución de 10 km cubriendo la región Catalana, parte de la Valenciana y las Islas Baleares (figura 9). El dominio capta las principales cuencas y cadenas montañosas que rodean a la región, como los Pirineos, el Sistema Ibérico o la Cuenca del Ebro (Cardoso et al., 2012). WRF-ARW permite seleccionar diferentes tipos de parametrizaciones y esquemas para

representar diferentes procesos físicos que se dan en la atmósfera. La configuración final del modelo se presenta en la tabla 1 y se basa en estudios previos realizados sobre Cataluña y la Península Ibérica (Jorba et al., 2008; Mercader et al., 2010), pero tiende a subestimar ligeramente la temperatura en superficie y a sobreestimar la precipitación acumulada (Gonçalves et al., 2013).

**Tabla 1. Parametrizaciones y configuraciones físicas seleccionadas para las simulaciones regionalizadas con el WRF-ARWv3.2.1.**  
(Fuente: Gonçalves et al., 2013)

Configuración del modelo	WRF-ARWv3.2.1
<b>Microfísica</b>	WSM-3 clases
<b>Radiación onda larga</b>	RRTM
<b>Radiación de onda corta</b>	Dudhia
<b>Capa límite (PBL)</b>	YSU
<b>Modelo del suelo</b>	Noah LSM
<b>Convección</b>	Kain-Fritsch

### 3.1.3 Re-análisis: ERA40

ERA-40 se elaboró teniendo en cuenta datos de medida de satélites, campañas de medida de aviones, boyas y radio sondajes, entre otras (ECMWF, 2007). Fue creado por ECMWF teniendo en cuenta los continuos cambios en los sistemas de observaciones y la disponibilidad de recursos computacionales. Comparado con otros re-análisis, ERA-40 proporciona una resolución horizontal y vertical más alta en la capa límite del planeta y en la estratosfera que las versiones anteriores, asimismo ha sido provisto con más observaciones, hace un uso más comprensivo de los datos de satélite y reprocessa medidas sin procesar donde sea posible (Uppala et al., 2005). En este caso ERA-40 se utiliza como condición de contorno del modelo mesoescalar WRF para, posteriormente, evaluarlo frente a otras bases de datos observacionales.

Las observaciones usadas en ERA-40 incluyen datos de archivos operacionales de ECMWF complementados con datos operacionales archivados por el Centro Nacional de Precicción Ambiental (NCEP, National Center for Environmental Prediction) y la Agencia Meteorológica Japonesa, entre otros centros. Son observaciones de superficie sinóptica procedentes de estaciones continentales y de barcos, así como de sonidos de radiosondas y globos piloto. La figura 5 muestra la distribución y frecuencia de los sonidos procedentes de los radionsondajes disponibles en ERA-40 para 1958, 1979 y 2001 (Uppala et al., 2005).

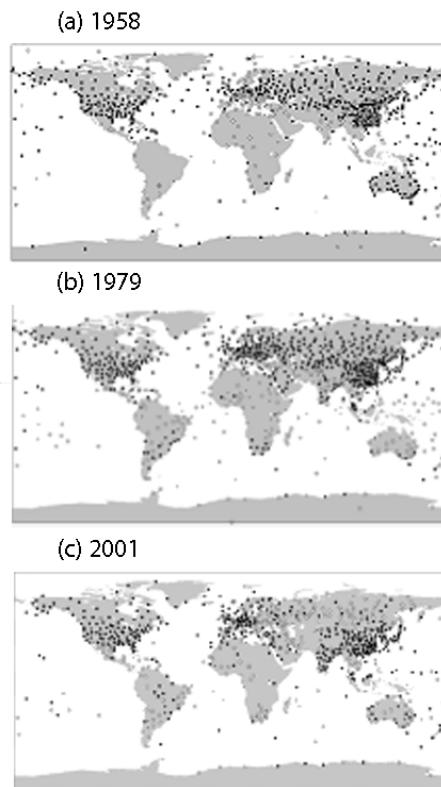


Figura 5. Distribución de radio-sondajes en (a) 1958 (b) 1979 y (c) 2001. (Fuente: Uppala, 2005)

Para el desarrollo de ERA40 fue necesario hacer uso del modelo de predicción atmosférica IFS, desarrollado conjuntamente por el ECMWF y Météo France, con una resolución espectral T159L60 (resolución horizontal 278 km o 2.5° y resolución vertical 60 niveles) para producir un análisis cada 6 horas. De manera que ERA-40 usa un período de asimilación de 6 horas, analizando la temperatura atmosférica, los vientos horizontales, la humedad, el ozono y una gran variedad de variables de superficie producidas para las principales horas sinópticas 00, 06, 12 y 18 UTC (Uppala et al., 2005).

#### 3.1.4 Modelo global: ECHAM5/MPI-OM

En el presente estudio se han utilizado los resultados de las simulaciones realizadas, por Gonçalves et al, 2013, con WRF-ECHAM5 para calcular los índices climáticos. De tal manera, que el modelo global ECHAM5/MPI-OM proporciona las condiciones de contorno e iniciales necesarias para las simulaciones regionales.

El modelo ECHAM5 es la quinta generación del modelo atmosférico de circulación general ECHAM, desarrollado conjuntamente por el Instituto de Meteorología Max Planck y el ECMWF. El ECHAM creado, parte de una versión anterior de un modelo numérico de predicción realizado



en el ECMWF y, desde entonces, ha estado en continua evolución en el Instituto de Meteorología Max Planck (Roeckner et al., 2003).

El ECHAM5 se aplica con una resolución T63, por lo que tiene una resolución horizontal de 200 km (1.875°) y 19 capas verticales con el tope de la atmósfera a 10hPa y unas coordenadas verticales híbridas sigma-presión. Este tipo de coordenadas tiene las propiedades de las coordenadas sigma en la atmósfera baja, que significa que siguen el terreno, y las propiedades de las coordenadas isobáricas en los niveles altos, es decir se van volviendo más horizontales a medida que aumenta la distancia desde la superficie hasta transformarse en superficies isobáricas puras en la estratosfera. El ECHAM5 incluye concentraciones de gases de efecto invernadero bien mezcladas, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC-11, CFC-12, Ozono troposférico y estratosférico, y aerosoles sulfatados. Además, tiene 340 años de simulaciones desde el año 1860 hasta el 2200 cuyos datos están disponibles cada 6 horas correspondiendo estas a las 00, 06, 18 y 18 UTC (Roeckner et al., 2003).

Este modelo ha demostrado ser uno de los modelos globales que reproducen mejor el clima actual de Europa y del Atlántico Norte bajo los forzamientos radiativos conocidos para el siglo XX (Van Ulden & Van Oldenborgh, 2006) y en especial para la zona Mediterránea Occidental (Altava-Ortiz, 2010). Por tanto, se puede considerar como uno de los mejores modelos para realizar proyecciones regionalizadas futuras del clima de todos los modelos considerados en el IPCC 2007 para la zona de estudio.

En total se han utilizado 4 simulaciones de este modelo:

1. Dos simulaciones para el clima del siglo XX: simulación 1 (Roeckner et al., 2005a) y simulación 3 (Roeckner, 2005b).
2. Dos simulaciones para el clima del siglo XXI forzadas por uno de los escenarios de emisión, definidos en el IEEE por Nakićenović *et al.* (2000), concretamente el escenario intermedio: IEEE-A1B simulación 1 (Roeckner *et al.*, 2006a) y IEEE-A1B simulación 3 (Roeckner *et al.*, 2006b).

Las diferencias entre las simulaciones 1 y 3 se deben principalmente a que las condiciones iniciales son diferentes en el modelo global, haciendo que de la simulación 1 de ECHAM5 resulten unos índices más cálidos que la simulación 3, que son más fríos.

La tabla 2 muestra un esquema resumiendo los modelos utilizados en este estudio y su función

Tabla 2. Resumen de los modelos utilizados

Período	Modelo regional	Forzado	Denominación	Función
1971-2000	WRF-ARW	Re-análisis ERA40	WRF-ERA40	Evaluar el comportamiento del modelo.
		Modelo global ECHAM5s1 ECHAM5s3	WRF-ECHAM5s1 WRF-ECHAM5s3	Proporcionar las condiciones iniciales y de contorno meteorológicas y superficiales al modelo regional.
2001-2050	WRF-ARW	Modelo global ECHAM5s1 ECHAM5s3	WRF-ECHAM5s1 A1B WRF-ECHAM5s3 A1B	Realizar proyecciones, en la zona de estudio, para observar el comportamiento de los extremos climáticos en el período 2001-2050.

Como se ha indicado anteriormente, en el presente estudio únicamente se trabajará con el escenario A1B, perteneciente a la familia A1, debido a que es el único utilizado en los modelos del proyecto ENSEMBLES. Los escenarios de la familia A1 proyectan un mundo con un crecimiento económico muy rápido, una población global que crece hasta mediados del siglo XXI para después disminuir, y la introducción de nuevas tecnologías cada vez más eficientes. Las concentraciones de CO<sub>2</sub> esperadas son entre medianas y altas. Dentro de esta familia se diferencian 3 tipos de escenarios diferentes dependiendo del tipo de fuente energética empleada (IPCC, 2007):

- A1FI: que se caracteriza por usar únicamente energías fósiles
- A1T: se caracteriza por usar fuentes energéticas de origen no fósil
- A1B: se caracteriza por un uso equilibrado entre energías fósiles y alternativas

La figura 6 muestra la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> globales según el escenario A1B, ya que el estudio se realizará bajo las condiciones de este escenario. Asimismo, la tabla 3 resume las condiciones en las que se basa el escenario.

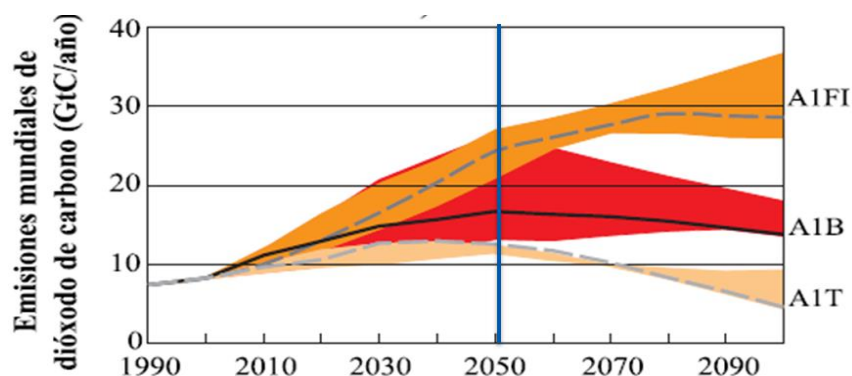


Figura 6. Proyección de la evolución de CO<sub>2</sub> (GtC/año) globales en los escenarios A1B, A1FI y A1T. (Fuente: IPCC, 2007)

Tabla 3. Principales variables socioeconómicas definitorias del escenario A1B.

Características	A1B
<b>Crecimiento demográfico</b>	Bajo
<b>Desarrollo económico</b>	Muy alto. Economía global
<b>Consumo energético</b>	Muy alto
<b>Nivel de emisiones</b>	Intermedio
<b>Cambio tecnológico</b>	Rápido

### 3.1.5 Proyecto ENSEMBLES

El proyecto ENSEMBLES, al utilizar mayor número de Modelos Climáticos Globales y Regionales a una resolución espacial más pequeña, sustituyó y mejoró al proyecto PRUDENCE, un proyecto finalizado en el 2004, cuyo objetivo era proporcionar proyecciones regionalizadas de cambio climático para Europa mediante regionalización dinámica para finales del siglo XXI (Brunet et al. , 2009).

El objetivo de ENSEMBLES es utilizar múltiples modelos climáticos para mejorar la exactitud y fiabilidad de las predicciones. El resultado de ese proyecto es una serie de predicciones futuras evaluadas para determinar cuál de ellas es más probable que ocurra que las otras. Esta información probabilística ayudará a los políticos, a todos los niveles, a determinar estrategias futuras para mitigar el cambio climático. El objetivo principal del proyecto ENSEMBLES es permitir que se mida la incertidumbre de las proyecciones climáticas y así tener más claro el clima futuro que puede tener lugar (Van der Linden, Mitchel, & Gilbert, 2009).

En el presente proyecto se han usado los resultados proporcionados por 11 de los 15 modelos climáticos regionales utilizados en ENSEMBLES. Todos ellos con una resolución horizontal de 25 km y forzados con diferentes modelos globales. Con esto se pretende observar si la evolución de los índices climáticos simulados es la misma utilizando modelos cuyas condiciones iniciales y de contorno son diferentes. Así, la tabla 4 resume algunas de las características de los modelos climáticos utilizados.

Tabla 4. Características de los modelos del proyecto ENSEMBLES utilizados. (Fuente: Gilbert, 2004)

Fuente	Modelo Global	Modelo Regional	Resolución horizontal	Resolución vertical	Cobertura temporal
<b>CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques)</b>	ARPEGE	CNRM-RM4	25 km	31 capas verticales	1971-2000 2001-2050
<b>KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut)</b>	ECHAM-r3	RACMO2	25 km	40 capas verticales	
<b>OURANOS (consortium on regional climatology and adaptation to climate change)</b>	CGCM3	Canadian RCMv4.2.1	25 km	29 capas verticales	
<b>SMHI (Swedish Meteorological Hydrological Institute)</b>	ECHAM-r3	RCA 3.0	25 km	25 capas verticales	
<b>MPI (Max Planck Institute for Meteorology)</b>	ECHAM-r3	REMOv5.7	25km	27 capas verticales	
<b>METNO (Norwegian Meteorological Institute)</b>	HadCM3Q0	HIRHAM	25 km	31 capas verticales	
<b>ETHZ (Swiss Institute for Technology)</b>	HadCM3Q0	CLM	25 km	32 capas verticales	
<b>HC (UK Met Office Hadley Centre for Climate Prediction and Research)</b>	HadRM3Q0	HadRM3	25 km	19 capas verticales	
<b>DMI (Danish Meteorological Institute)</b>	ARPEGE	HIRHAM	25 km	31 capas verticales	
<b>ICTP (The Abdus Salam Intl. Centre for Theoretical Physics)</b>	ECHAM-r3	REGCM3	25 km	16 capas verticales	

Los índices climáticos calculados con los resultados de los modelos de ENSEMBLES se compararán con aquellos dados por WRF-ERA40 y por WRF-ECHAM5 con el fin de analizar las tendencias y la variabilidad de los diferentes modelos.

### **3.2 Observaciones**

Una de las principales herramientas para la investigación climática y las proyecciones futuras son las observaciones, que proceden de una gran variedad de fuentes (Trenberth, 2008). La inicialización y validación de los modelos ha de hacerse en base a los fenómenos observados, por lo que se han ido desarrollando redes de estaciones nacionales e internacionales que registran periódicamente las principales variables meteorológicas (presión, temperatura, precipitación, etc.). Asimismo estas bases de datos suelen ser utilizadas para generar una serie de mallas regulares de alta resolución, espacial y temporal, de datos interpolados permitiendo un análisis espacialmente homogéneo y siendo de gran utilidad para la caracterización de la climatología regional, así como para la validación, regionalización y calibración de los modelos globales y regionales. El objetivo de los métodos de interpolación es estimar el valor de una variable en un lugar en el que no existen datos procedentes de las observaciones, a partir de los valores observados de esa variable en el entorno de esa localización. Sin embargo, este tipo de mallas tienen sus limitaciones, una de ellas es que los eventos extremos, especialmente en el caso de la precipitación, pueden resultar suavizados en el proceso de interpolación (Herrera García, 2011).

Para llevar a cabo este estudio se han utilizado como observaciones dos bases de datos principales: E-OBS (Haylock et al., 2008) y SPAIN02 (Herrera García, 2011)

#### **3.2.1 E-OBS**

E-OBS es una malla de alta resolución que proporciona datos diarios de precipitación y temperatura superficial en el territorio Europeo desde 1950 hasta el 2012. Esta base de datos fue desarrollada como parte del proyecto ENSEMBLES con el objetivo de utilizarla para validar los RCMs usados en el mismo para estudiar el cambio climático. Las observaciones diarias que componen esta base de datos pública han sido posibles gracias a la organización European Climate Assessment and Data Set (ECA&D: <http://eca.knmi.nl/>), liderada por el instituto meteorológico nacional holandés (KNMI). E-OBS lo conforman estaciones pertenecientes al ECA&D, así como estaciones procedentes del proyecto STARDEX, del Sistema Climático de Observación Global (GCOS), de la Red Climatológica Histórica Global (GHCND) y el Programa Alpino de Mesoescala (MAP), constituyendo una red de observaciones con un total de 2316 estaciones meteorológicas. Se ha empleado un proceso de interpolación de tres pasos para los

datos diarios: interpolando primero la precipitación total mensual y la temperatura media mensual. Después se interpolan las anomalías diarias usando un indicador y diversos métodos que tienen en cuenta, para la temperatura, un factor de elevación externo, por último se combinan las estimaciones mensuales y diarias. Además, esta base de datos incluye las incertidumbres asociadas al muestreo y a la interpolación (Haylock et al., 2008).

E-OBS está disponible en dos mallas regulares de tipo latitud-longitud a  $0.25^\circ$  y  $0.5^\circ$  ( $\approx 25$  y  $50$  km respectivamente). En el presente proyecto se ha usado la malla regular de tipo latitud-longitud con una resolución de  $25$  km. El método de interpolación se diseñó para estimar de la mejor manera posible los valores medios de cada celda, en lugar de tener valores por cada punto. Esto permite una comparación directa con las simulaciones realizadas con los RCMs. También se calcularon los errores estándar (como una medida de incertidumbre de la interpolación) y la elevación de la superficie (Van der Linden et al., 2009).

La figura 7 muestra el mapa con la red de estaciones de precipitación y temperatura.

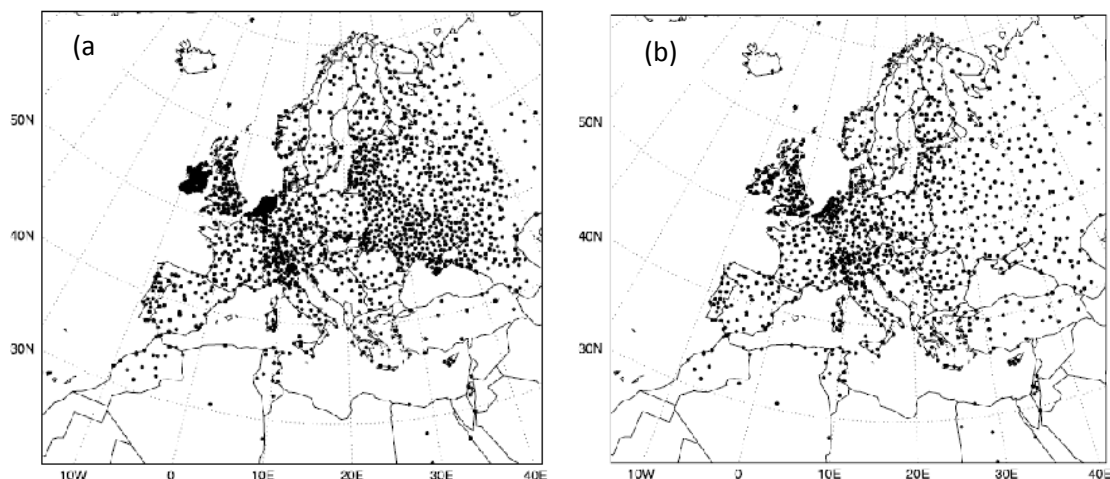


Figura 7. Red de estaciones meteorológicas del E-OBS: (a) precipitación y (b) temperatura. (Fuente: Haylock et al. 2008)

En la figura 7 se puede observar que los sitios con mayor densidad de estaciones tanto de precipitación como de temperatura son Irlanda, Holanda y Suiza. Por otra parte, los sitios con menor densidad son España, el Norte de África, los Balcanes y el norte de Escandinavia (Haylock et al., 2008). Por lo que, teóricamente el menor número de estaciones hace que la representación de los índices climáticos se ajuste menos a la realidad que en otros sitios en los que hay mayor densidad.

### 3.2.2 SPAIN02

SPAIN02 (SP02 a partir de ahora), es una base de datos desarrollada conjuntamente entre la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el grupo de Meteorología de Santander (Universidad de Cantabria-CSIC: [www.meteo.unican.es](http://www.meteo.unican.es)), en la que se han interpolado datos diarios de temperatura y precipitación en una malla regular de alta resolución ( $0.2^\circ \approx 20$  km) que cubre el territorio peninsular español y las Islas Baleares (figura 7). Proporciona datos desde 1950 hasta el 2008 usando un total de 2756 estaciones de calidad contrastada incluidas en la red secundaria de la Agencia Estatal de Meteorología (Herrera García, 2011).

El procedimiento de interpolación utilizado en SP02 es similar al de E-OBS, excepto que, al principio, en la temperatura, la elevación no se consideró como co-variable, ya que la topografía estaba bien representada por la gran cantidad de estaciones que poseía. Al contrario que en la precipitación, la base de datos de la temperatura fue construida a partir de una pequeña red de estaciones con los registros más largos, en particular, solo fueron incluidas en la interpolación aquellas estaciones con un registro mayor de 40 años y menos de un 1% de datos perdidos. En el caso de España, SP02 da una mejor representación de la precipitación y la temperatura en comparación con E-OBS, debido a la mayor cantidad de estaciones usadas para conformar la base de datos (Herrera et al., 2010).

En el presente proyecto se ha usado la versión Spain02\_v2.1, debido a que ha sido la única versión de la que se disponen datos. Se distingue por tener datos hasta marzo de 2008 y por proporcionar valores interpolados de temperatura máxima y mínima. En esta versión se incluyó la orografía como co-variable. Además, se corrigieron los errores detectados en la temperatura máxima de los meses de septiembre de 1964 y junio de 1997.

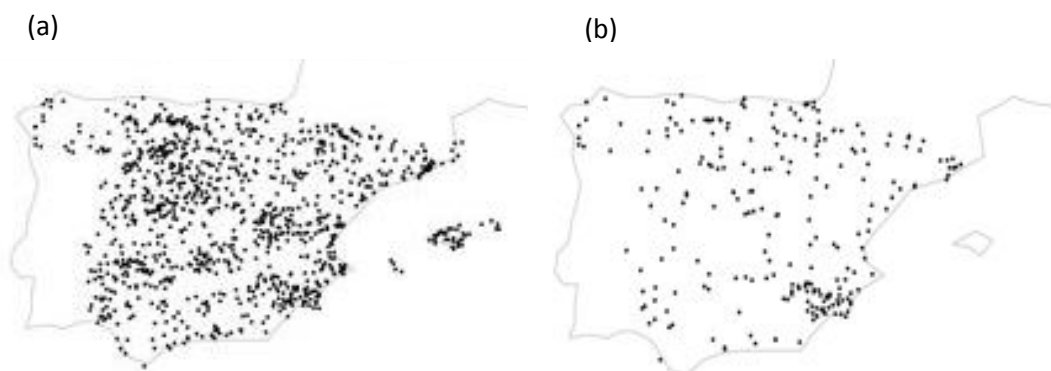


Figura 8.Red de estaciones meteorológicas del SPAIN02. (a) Precipitación y (b) Temperatura (Fuente: Herrera García, 2011)

En la figura 8 se puede observar que las zonas con mayor densidad de estaciones están en Cataluña y en la Comunidad Valenciana y, en relación a la precipitación, también en Baleares. La zona donde más datos hay coincide con la zona de estudio por lo que habrá mejores representaciones del clima extremo.

### 3.3 Dominios

Para llevar a cabo las simulaciones se define una configuración con dos dominios anidados unidireccionalmente: un primer dominio sobre Europa a una resolución de 30 km (D01, 41°N 0°E, 100x100 células) y otro sobre la zona de interés, Noroeste de la Cuenca Mediterránea, con una resolución de 10 km (D02, 41°N 0°E, 76x76 celdas, figura 9). Esta configuración permite optimizar los tiempos de cálculo y reducir los efectos de las condiciones de contorno, derivadas del incremento de resolución desde el modelo global (1.875°) a la del dominio final (10 km, Gonçalves et al., 2013). Cada uno de los modelos está creado sobre una malla diferente aunque todos tienen una resolución espacial similar, es por ello que para poder realizar una comparación entre modelos y bases de datos todos ellos han sido interpolados a la malla original de la base de datos de SP02 resultando una figura mallada con 37x29 celdas sobre la zona de estudio.

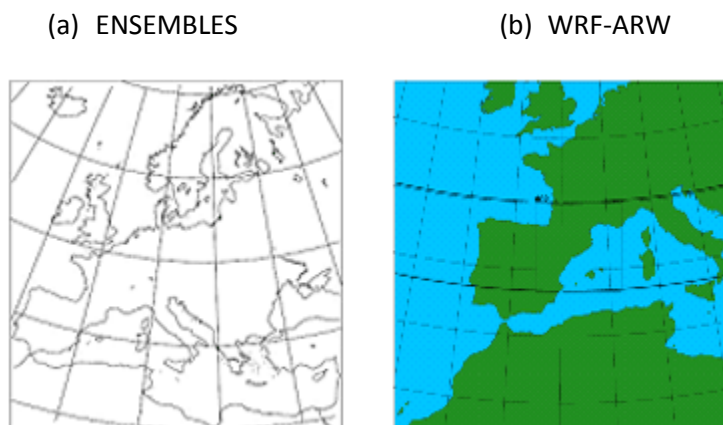


Figura 9. Dominios de (a) los modelos del proyecto ENSEMBLES. (Fuente: Gilbert, 2004) (b) dominio del WRF-ARW de la zona de estudio. (Fuente: Gonçalves et al., 2013)

La definición de los dominios de WRF se hace de manera que no se den discontinuidades o roturas en los elementos orográficos que puedan influenciar la dinámica atmosférica a escala regional. La proyección seleccionada es la recomendada para estas latitudes, la *Lambert Conformal Conic*, se ha escogido una resolución vertical de 33 niveles hasta los 10hPa, para



poder capturar de manera adecuada los procesos de transporte troposfera-estratosfera (Gonçalves et al., 2013).

### **3.4 Índices climáticos**

Los impactos del cambio climático son diversos y varían regionalmente tanto en su severidad como en su frecuencia. La rara ocurrencia de los extremos hace necesario investigarlos para determinar los cambios en su frecuencia e intensidad (Sillmann & Roeckner, 2008). Los eventos extremos tienden a ser más relevantes para la sociedad y para los sistemas naturales, debido a que cuanto más extremo sea un evento, más probable es que cause daños ambientales y sociales (Zhang et al., 2011). Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM) los índices climáticos son útiles para caracterizar el clima, presentar los patrones climáticos históricos y detectar los cambios producidos en el mismo. Una buena caracterización del clima requiere índices que representen la amplitud, persistencia y frecuencia de los extremos climáticos. Así, según el cuarto informe del IPCC hay una alta probabilidad de que algunos de los extremos climáticos lleguen a ser más frecuentes e intensos durante el siglo XXI (Klein Tank et al., 2009).

Para tener una perspectiva uniforme en los cambios observados en la meteorología y los extremos climáticos el grupo de expertos en la detección del cambio climático e índices (ETCCDI en inglés, disponible en : [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)) ha definido un total de 27 índices climáticos extremos de temperatura y precipitación que describen las características particulares de los mismos, incluyendo frecuencia, amplitud y persistencia. En el presente proyecto se han calculado 11 de los 27 índices determinados, ya que en una zona caracterizada por tener una temperatura mediana anual de entre 10 y 15°C y una precipitación muy variable (Servei Meteorològic de Catalunya, 2013), se considera que los índices definidos en la tabla 5, serán los que mejor definan la zona de estudio.

Tabla 5. Definición de los índices climáticos utilizados. (Fuente: Zhang et al , 2011)

Índice climático	Representativo	Acrónimo	Definición
<b>Percentil 95 de la temperatura máxima</b>	Amplitud	95pTX	Percentil 95 de la temperatura máxima diaria para el período de control (1971-2000). Marca el límite superior de la temperatura máxima del aire
<b>Percentil 5 de la temperatura mínima</b>	Amplitud	05pTN	Percentil 05 de la temperatura mínima diaria para el período de control (1971-2000). Marca el límite inferior de la temperatura mínima del aire
<b>Rango de temperaturas extremas</b>	Amplitud	ETR	Diferencia entre el máximo de las temperaturas máximas y el mínimo de las temperaturas mínimas.
<b>Días de helada</b>	Frecuencia	FD	Número de días en un año en que la temperatura mínima es menor de 0°C
<b>Noches tropicales</b>	Frecuencia	TN	Número de días en un año en que la temperatura mínima es mayor de 20°C.
<b>Índice de duración de las olas de calor</b>	Persistencia	HWDI	Número de días en un año donde en intervalos de, al menos , 6 días consecutivos la temperatura máxima diaria es más de 5°C por encima de un valor de referencia ( calculado como la media de las temperaturas máximas de cinco días)
<b>Longitud máxima de la racha seca</b>	Persistencia	CDD	Máximo número de días consecutivos en un año en que la precipitación total diaria es menor de 1mm
<b>Longitud máxima de la racha húmeda</b>	Persistencia	CWD	Máximo número de días consecutivos en un año en que la precipitación total diaria es mayor de 1 mm
<b>Máximo de precipitación en 1 día</b>	Frecuencia	RX1DAY	Máximo valor en la precipitación diaria en un año.
<b>Días de precipitación abundante</b>	Frecuencia	R20mm	Número de días en un año en que la precipitación diaria total es mayor a 20 mm
<b>Precipitación total anual en los días muy lluviosos</b>	Amplitud	R95PTOT	Precipitación total anual ( en días en que la precipitación diaria es mayor a 1 mm) donde la precipitación total diaria acumulada es superior al percentil 95

#### 4. RESULTADOS

Los resultados que se presentarán a continuación se dividen en dos partes: primero se realizará una evaluación de los índices explicados en el apartado anterior para un período de control definido entre los años 1971 y 2000 y se compararán con los calculados con las bases de datos observacionales. Posteriormente se analizarán en detalle los mismos índices para las proyecciones realizadas por ambas simulaciones del modelo WRF-ECHAM5 (WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3).

Tanto en el proceso de evaluación como en el de las proyecciones, se hace un análisis temporal en base anual para todos los índices de temperatura y precipitación. En las últimas décadas, en

la zona Mediterránea, los principales daños han sido debidos a las sequías, inundaciones y las olas de frío y de calor (Sánchez et al., 2004). Por ello se realiza un análisis espacial estacional para los días de helada, las noches tropicales, la longitud de la racha húmeda y la longitud de la racha seca.

#### **4.1 Evaluación del modelo para el período de control (1971-2000)**

En la evaluación del modelo es necesario el cálculo de algunos estadísticos con el fin de cuantificar el ajuste de resultados entre modelos y observaciones, es decir si los modelos sobrestiman o subestiman las observaciones y en cuánto lo hacen. Asimismo, se ha calculado la variabilidad de los modelos que viene dada por la desviación típica en los índices de temperatura y el coeficiente de variación en los índices de precipitación, ambos son medidas de dispersión y dan una idea de la amplitud de los índices. Para cuantificar la sobrestimación o subestimación con respecto a las observaciones por parte de WRF-ERA40 se ha calculado el sesgo para cada índice. También se ha obtenido para cada uno de los índices la matriz de correlaciones, de tal manera que cada coeficiente de correlación puede proporcionar una posible relación temporal entre los modelos y observaciones, refiriéndose principalmente a la dirección que toman los índices representados por cada modelo (si aumentan o disminuyen) y a la cercanía entre los modelos. Así, cuanto más cercano a 1 sea el valor de los coeficientes más relacionados estarán el modelo y las observaciones.

##### **4.1.1 Evaluación de índices de temperatura**

A continuación, se representan las anomalías de los índices de temperatura, tanto de los modelos como de las observaciones, con el fin de observar cómo varían anualmente los índices con respecto a todo el período de control (1971-2000). Las anomalías se definen como la diferencia entre el promedio anual de cada índice y el promedio del mismo para los 30 años del período de control.

#### 4.1.1.1 Percentil 5 de la temperatura mínima

El rango del percentil 5 (05pTN) de la temperatura mínima, en promedio para todo el dominio, derivado de WRF-ERA40 se encuentra entre -4.16 y -0.55 °C para todo el período de control, lo cual está dentro del rango de SP02 e E-OBS (Anexo I, Tabla 1).

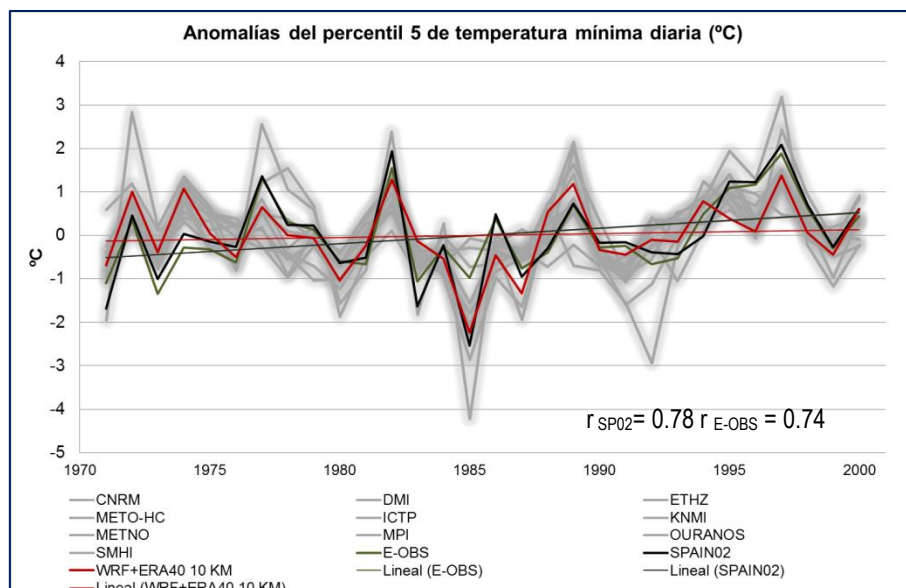


Figura 10. Anomalías percentil 5 de la temperatura mínima diaria (05pTN) para el período de control.

En la figura 10 las observaciones muestran un incremento del percentil 5 de la temperatura mínima de 1 °C, mientras que en WRF-ERA40 el aumento es de, aproximadamente, 0.2 °C entre 1971 y el 2000. Asimismo, se puede apreciar que WRF-ERA40 sigue bastante bien las observaciones, así como los modelos de ENSEMBLES. El modelo muestra una variabilidad similar a SP02 y algo menor en comparación con E-OBS ( $SD_{WRF-ERA40}=0.89$ ,  $SD_{E-OBS}=1.13$ ,  $SD_{SP02}=0.89$ ). No obstante, WRF-ERA40 sobrestima las observaciones, especialmente las proporcionadas por E-OBS, como se puede comprobar con el sesgo cuyo valor, en relación a E-OBS, es de 1.28 y de 0.02 con respecto a SP02 (Anexo II, tabla 1).

La matriz de correlaciones, calculadas en base al período de control 1971-2000, indica que las observaciones y el modelo WRF-ERA40 están relacionadas año a año, ya que cuando las observaciones muestran un aumento en el índice, los modelos aumentan y viceversa. Los coeficientes de correlación del modelo en relación a SP02 y a E-OBS de 0.78 y 0.74 respectivamente (Anexo III, tabla 1).

#### 4.1.1.2 Percentil 95 de la temperatura máxima

El rango entre el que se mueve el percentil 95 de la temperatura máxima (95pTX) dado por WRF-ERA40, está entre 24.37 y 29.53 °C situándose dentro del rango de las observaciones, tanto de SP02 como de E-OBS (Anexo I, tabla 2).

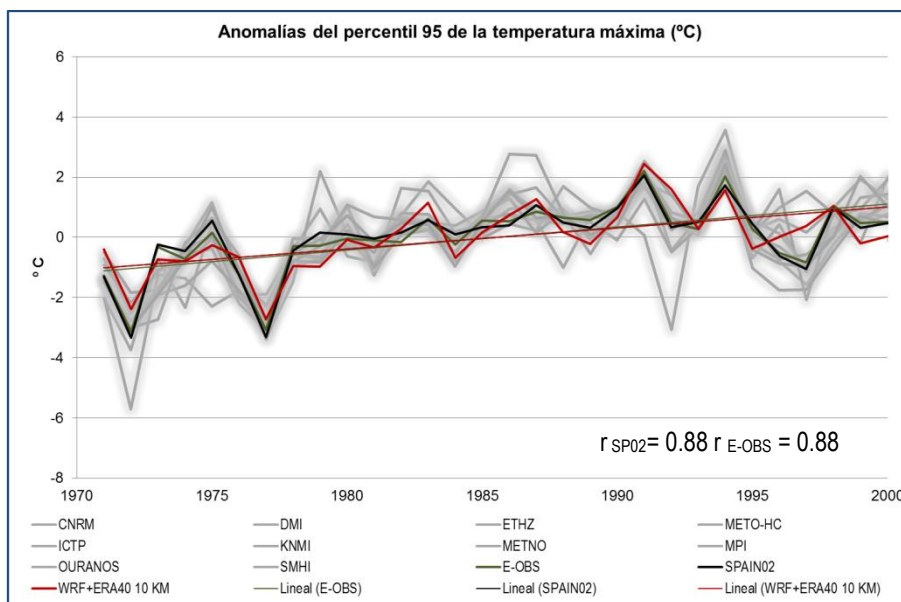


Figura 11. Anomalías del percentil 95 de la temperatura máxima (95pTX) para el período de control

En la figura 11 se puede ver un incremento general del percentil 95 de la temperatura máxima de alrededor de 1 °C entre 1971 y 2000, ya que no hay una gran diferencia entre las observaciones y WRF-ERA40. El modelo varía menos que las observaciones, ya que su desviación típica es algo menor ( $SD_{WRF-ERA40} = 1.08$ ,  $SD_{E-OBS} = 1.17$ ,  $SD_{SP02} = 1.16$ ).

Los coeficientes de correlación del modelo con respecto a las observaciones demuestran que WRF-ERA40 en este índice se ajusta mejor que en el caso del índice anterior, puesto que tanto para E-OBS como para SP02 los coeficientes de correlación son bastante altos siendo 0.88 en ambos casos (Anexo III, tabla 2). El modelo subestima las observaciones, como evidencian los valores del sesgo del modelo (Anexo II, tabla 16) con respecto a E-OBS (-5.79) y a SP02 (-4.54).

### 4.1.1.3 Rango de temperaturas extremas

El rango de temperaturas extremas (ETR), en promedio para todo el dominio, según el modelo varía entre 17.14 y 28.02 °C para todo el período de control. (Anexo I, tabla 3).

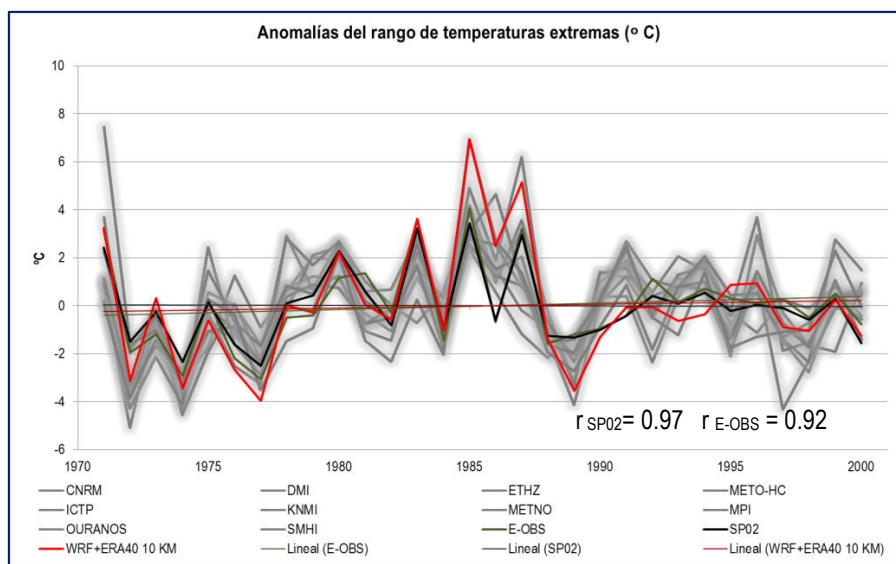


Figura 12. Anomalías del rango de temperaturas extremas (ETR) para el período de control

En la figura 12 se aprecia un ligero incremento en el rango de temperaturas extremas especialmente en E-OBS y en WRF-ERA40 aunque los modelos de ENSEMBLES también aumentan ligeramente. Así, en E-OBS, este índice aumenta alrededor de 1 °C y en WRF-ERA40 el incremento es ligeramente menor, cerca de 0.8 °C. Sin embargo, SP02 no experimenta aumento alguno, sino que el rango de temperaturas extremas es más o menos constante a lo largo de los 30 años. En lo que respecta a la variabilidad, en este índice el modelo es más variable que las observaciones (Anexo I, tabla 3) con un valor mayor de la desviación típica ( $SD_{WRF-ERA40} = 2.47$ ,  $SD_{E-OBS} = 1.78$ ,  $SD_{SP02} = 1.55$ ).

Además, WRF-ERA40 sigue la tendencia de las observaciones aunque las sobrestima, pudiendo constatarlo con su sesgo correspondiente. De manera que WRF-ERA40 sobrestima a E-OBS en 3.43 °C y a SP02 en 3.80 °C (Anexo II, tabla 1). No obstante, los coeficientes de correlación indican que el modelo se ajusta bien a las observaciones teniendo unas correlaciones en relación con SP02 y E-OBS de 0.97 y 0.92 respectivamente (Anexo III, tabla 3).

#### 4.1.1.4 Duración de olas de calor

La duración de olas de calor (HWDI) derivadas de WRF-ERA40 varían entre 57 y 101 días siguiendo un rango parecido al de E-OBS y SP02 (Anexo I, tabla 4).

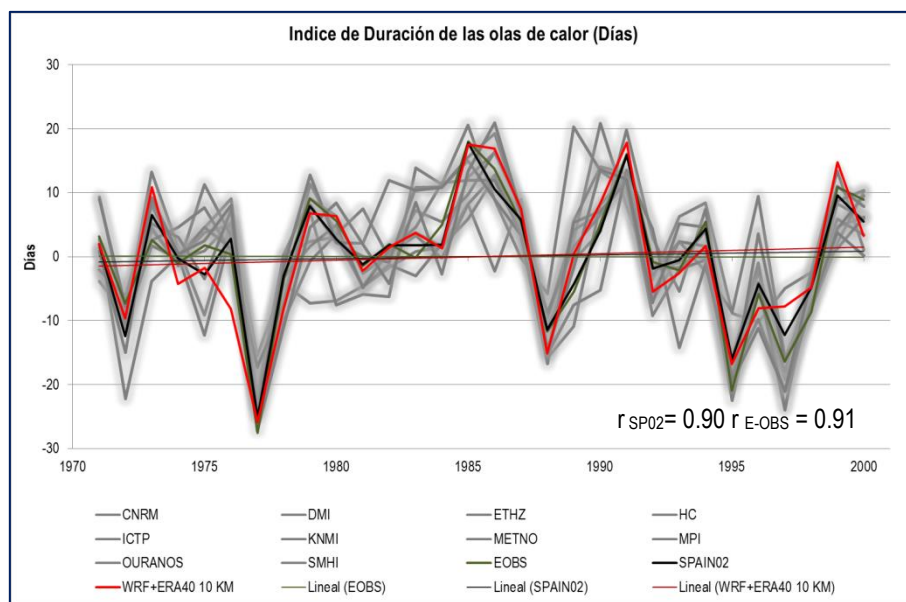


Figura 13. Anomalías del índice de duración de olas de calor (HWDI) para el período de control

En la figura 13 se puede advertir un incremento de las olas de calor de aproximadamente 4 días entre 1971 y 2000 según SP02 y WRF-ERA40, mientras que en E-OBS se muestra más o menos constante para todo el período de control. Se puede ver que a cada aumento de este índice le sigue una gran disminución del mismo. De tal manera que hay cuatro grandes períodos en los que la duración de las olas de calor disminuye en más de 20 días, correspondientes a los años 1977, 1988, 1995 y 1997.

La desviación típica confirma que, tanto el modelo como las observaciones (E-OBS y SP02) son muy variables en este índice ( $SD_{WRF-ERA40} = 10.35$ ,  $SD_{E-OBS} = 10.22$ ,  $SD_{SP02} = 9.22$ ), aunque WRF-ERA40 tiene una variabilidad algo mayor que E-OBS y SP02 (Anexo I, tabla 4). De igual forma, WRF-ERA40 sigue las tendencias de las observaciones y se ajusta bien a las mismas (Anexo III, tabla 4) como se puede comprobar en los coeficientes de correlación ( $R_{E-OBS} = 0.91$ ,  $R_{SP02} = 0.90$ ). Asimismo, el sesgo revela que el modelo subestima las observaciones teniendo unos valores de -5 y -4 días correspondientes a E-OBS y a SP02 respectivamente (Anexo II, tabla 1).

#### 4.1.1.5 Días de helada

El rango en el que se encuentran los días de helada (FD) proporcionados por WRF-ERA40, varía entre 30 y 67 días en todo el período (Anexo I, tabla 5).

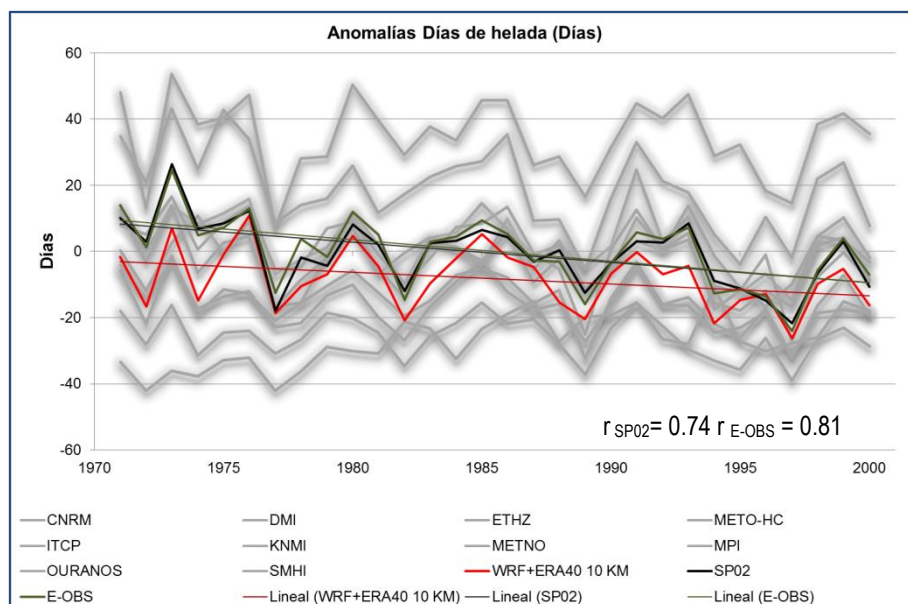


Figura 14. Anomalías de los días de helada (FD) para el período de control

En la figura 14 se distingue una disminución en los días de helada de 20 días en todo el período de control, tanto para E-OBS como para SP02, mientras que WRF-ERA40 experimenta una disminución de alrededor de 10 días. La desviación típica de WRF-ERA40 manifiesta una variabilidad algo menor en comparación con E-OBS y SP02 ( $SD_{WRF-ERA40}=9.23$ ,  $SD_{E-OBS}=10.62$ ,  $SD_{SP02}=10.22$ ), aunque mayor que en otros modelos de ENSEMBLES (Anexo I, tabla 5). Teniendo el modelo unos coeficientes de correlación por encima de 0.7 (Anexo III, tabla 5) se puede considerar que se ajusta bastante bien a E-OBS y SP02 ( $R_{E-OBS}=0.81$ ,  $R_{SP02}=0.74$ ). Sin embargo, hay una clara subestimación del modelo durante todo el período, de forma que WRF-ERA40 se ve subestimado, aproximadamente 8 días con respecto a E-OBS y a SP02 (Anexo II, tabla 1).

A continuación, se representan espacialmente los días de helada por estaciones, proporcionados por SP02, E-OBS y WRF-ERA40.



## Días de helada por estaciones

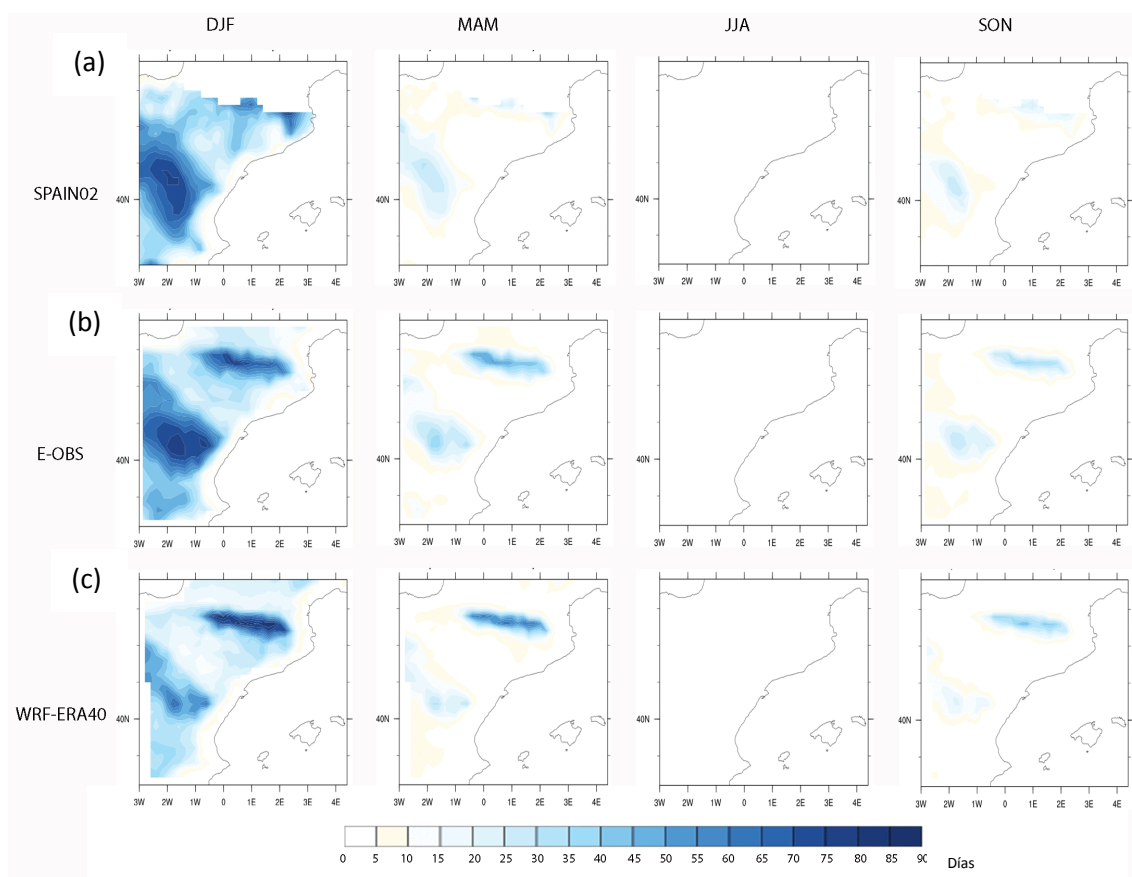


Figura 15. Días de helada por estaciones para (a) Spain02, (b) E-OBS y (c) WRF-ERA40, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)

La figura 15 muestra que tanto en SP02 como en E-OBS, la estación en la que más días de helada hay corresponde al invierno con un máximo de 80 días, en Los Pirineos y el Sistema Ibérico. En primavera y en otoño los días de helada disminuyen drásticamente, de manera que E-OBS registra en primavera un máximo de 50 días en la zona de los Pirineos y un período un poco menor en SP02. En otoño se dan entre 30 y 35 días de helada en la zona del Pirineo y el Sistema Ibérico. Al contrario que en las otras estaciones, en verano no se observa ningún día de helada.

Con respecto a WRF-ERA40 los días de helada calculados son menores que en las observaciones. De tal forma que los valores máximos se siguen dando en invierno, con alrededor de 75 días de helada en la zona pirenaica y cerca de 65 días en el Sistema Ibérico. En primavera y en otoño los días de helada disminuyen de tal manera que sólo se registran valores en las zonas montañosas, Pirineos y Sistema Ibérico. Se registra un máximo de aproximadamente 45 días, en primavera, y de 35 en otoño. Al igual que en E-OBS y SP02, en verano no se registran días de helada.

#### 4.1.1.6 Noches tropicales

Las noches tropicales (TN) calculadas por el modelo varían entre 0 y 10 días para todo el período de control estando dentro del rango medido por E-OBS y SP02 (Anexo I, tabla 6).

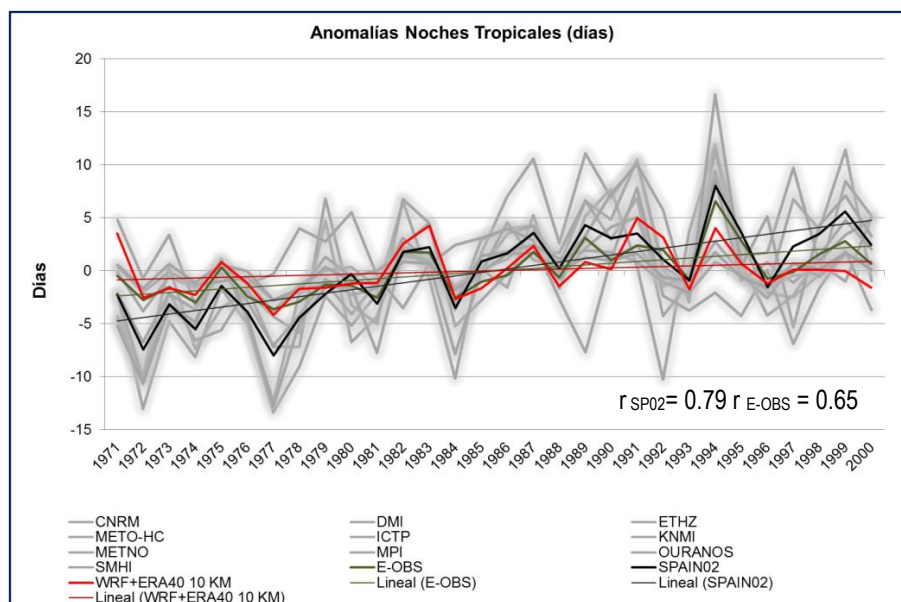
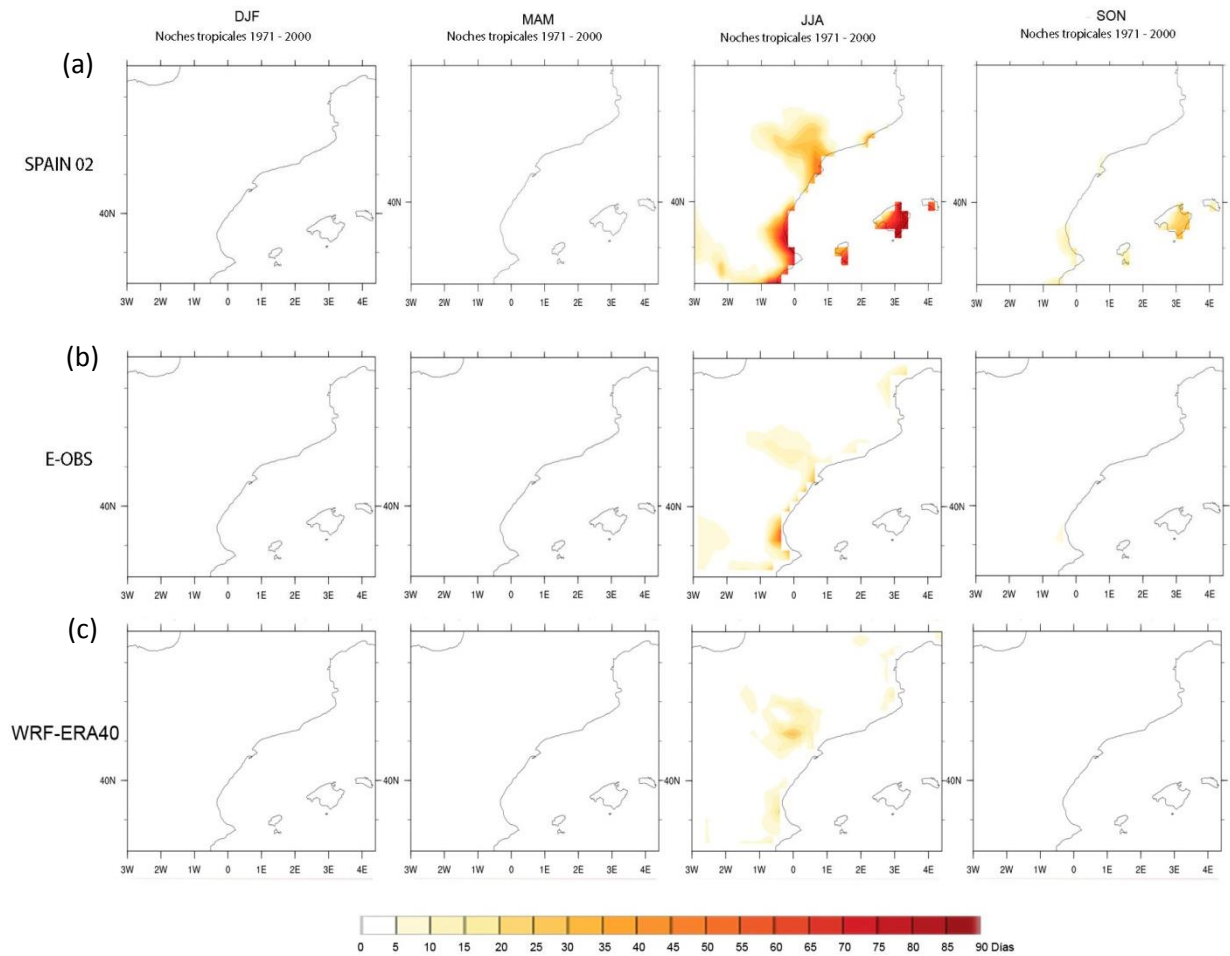


Figura 16. Anomalías de las noches tropicales (TR) para el período de control

En la figura 16 se aprecia que tanto para las observaciones como para WRF-ERA40, las noches tropicales aumentan cerca de 10 días según SP02, 5 días para E-OBS y 1 día para WRF-ERA40. Al contrario que en los días de helada, en las noches tropicales no hay una gran variabilidad, siendo el valor de su desviación típica de 2.32 (Anexo I, tabla 6), similar a E-OBS ( $SD_{E-OBS}=2.33$ ) y algo menor que Spain02 ( $SD_{SP02}=3.85$ ). Los coeficientes de correlación (Anexo III, tabla 23) verifican la buena adaptación del modelo a las observaciones ( $R_{SP02}=0.79$ ,  $R_{E-OBS}=0.65$ ). A pesar de ello, el sesgo (Anexo II, tabla 1) confirma que el modelo se ve ligeramente sobrestimado con respecto a E-OBS (0.91), pero subestimado de manera más clara en relación a SP02 (-6.39).

## Noches tropicales por estaciones



**Figura 17. Noches tropicales por estaciones para (a) Spain02, (b) E-OBS y (c) WRF-ERA40, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)**

La figura 17 muestra las noches tropicales por estaciones en la zona de estudio. De modo que tanto WRF-ERA40 como E-OBS dan noches tropicales en verano únicamente, mientras que en SP02 también se dan en otoño. Así, SP02, en verano, da un máximo de 55 días en Baleares y en la Costa Valenciana. E-OBS proporciona un valor máximo de, aproximadamente, 35 noches tropicales en la zona de la Costa Valenciana. En otoño, las noches tropicales en SP02, disminuyen hasta alcanzar un máximo de 15 días en Baleares y 5 en la Costa Valenciana.

En WRF-ERA40, las noches tropicales se ven subestimadas con respecto a las dadas por E-OBS y SP02. Así, en invierno, en primavera y en otoño WRF-ERA40 no percibe medida alguna, al igual que E-OBS. Sin embargo, en verano el modelo muestra un máximo de 25 días en el Cuenca del Ebro, aunque también se registran datos en la costa Brava y en la costa Valenciana.

#### 4.1.2 Evaluación de índices de precipitación

A continuación se representan las anomalías de los distintos índices de precipitación para el mismo período de control que los índices anteriores (1971-2000)

##### 4.1.2.1 Máximo de precipitación en 1 día

El valor máximo de precipitación en 1 día (RX1DAY), dado por WRF-ERA40, varía entre 25.61 y 50.02 mm/día (Anexo I, tabla 7).

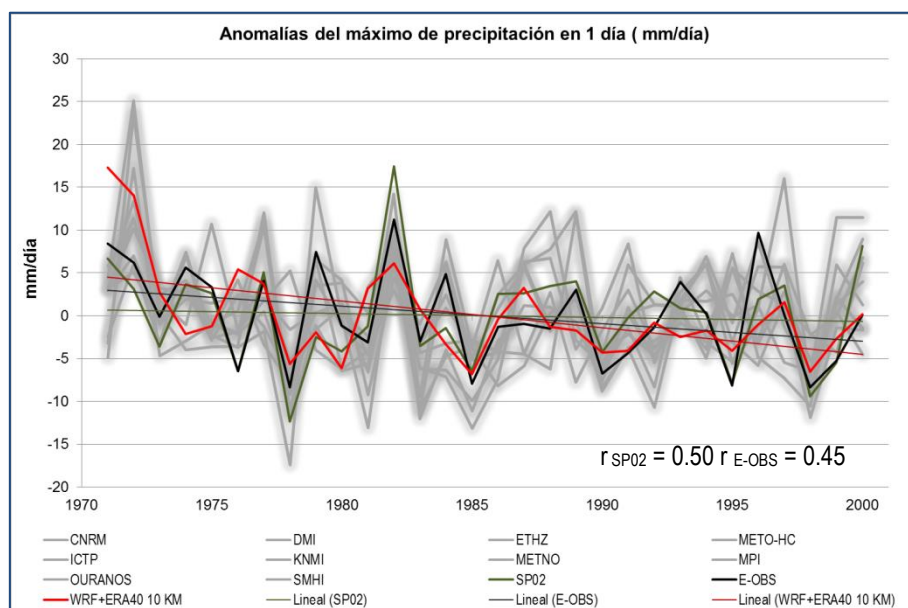


Figura 18. Anomalías del máximo de precipitación en 1 día (RX1DAY) en el período de control

La figura 18 representa las anomalías de RX1DAY para el período de control, pudiéndose apreciar una clara disminución para todo el período. De manera que según E-OBS el valor de RX1DAY disminuye alrededor de 2 mm/día, para SP02 disminuye cerca de 6 mm/día, mientras que WRF-ERA40 muestra una disminución aproximada de 10 mm/día. En la gráfica se aprecian dos períodos donde la precipitación máxima tiene un gran aumento correspondiente a los años 1971 y 1982 en los cuales tuvieron lugar grandes inundaciones (Martín Vide & Llasat Botija, 2000).

WRF-ERA40 tiene una variabilidad moderada, similar a la que presentan las observaciones, E-OBS y SP02 ( $CV_{WRF-ERA40} = 17\%$ ,  $CV_{E-OBS} = 17\%$ ,  $CV_{SP02} = 13\%$ ), así como a otros modelos de ENSEMBLES (Anexo I, tabla 7). De modo que, WRF-ERA40 aunque sigue la tendencia de las

observaciones, estas se ven subestimadas, especialmente con respecto a SP02 cuyo sesgo relativo es un 30%. Sin embargo, el modelo se ve subestimado un 3% con respecto a E-OBS (Anexo II, tabla 2). En este caso, el modelo se ajusta peor a las observaciones, en comparación con otros modelos de ENSEMBLES (EHTZ, KNMI, MPI) ya que tiene unas correlaciones de 0.45 y 0.50 correspondientes a SP02 y a E-OBS respectivamente (Anexo III, tabla 7).

#### 4.1.2.2 Días de precipitación abundante

El rango en los días de precipitación abundante (R20mm) definido por WRF-ERA40 se encuentra entre 4 y 8 días, siendo similar al dado por E-OBS y SP02 (Anexo I, tabla 8).

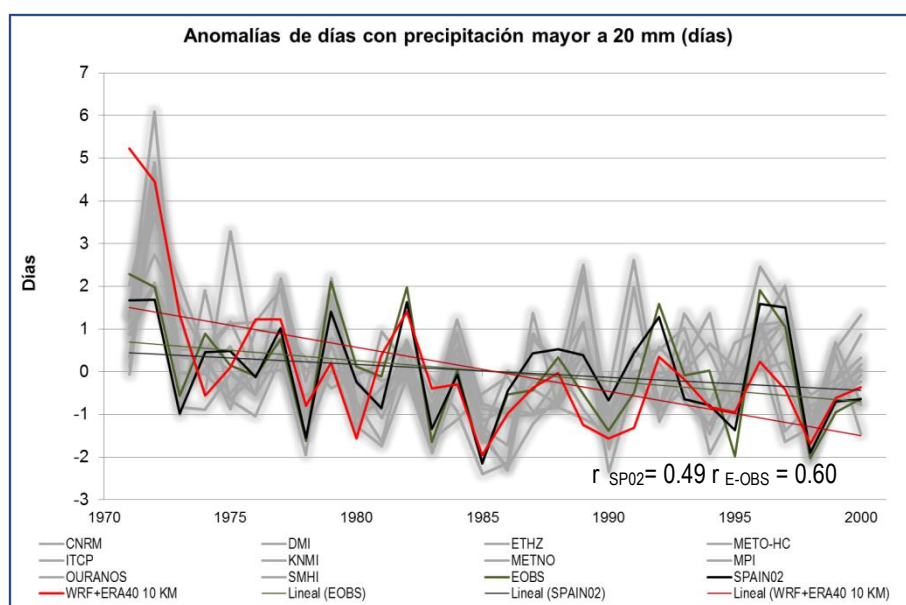


Figura 19. Anomalías de los días de precipitación abundante (R20mm) en el período de control

En la figura 19 se observa que los días de precipitación abundante disminuyen en todo el período de control. El modelo subestima los valores dados por este índice en relación con SP02 con un sesgo relativo del 3%, mientras que en lo que respecta a E-OBS hay una sobrestimación del 30% (Anexo II, tabla 2). Se advierte que tanto en SP02 como en E-OBS hay una disminución de alrededor de 1 día, mientras que en WRF-ERA40, la precipitación abundante disminuye cerca de 3 días entre 1971 y 2000, por lo que no se considera una caída muy significativa. Hay un pico máximo al principio del período, en el año 1971, coincidiendo con uno de los años con mayores precipitaciones (Martín Vide & Llasat Botija, 2000). El modelo se relaciona algo peor con las

observaciones en comparación con otros modelos, ajustándose mejor a E-OBS con un coeficiente de correlación de 0.60 que a SP02 cuyo coeficiente es de 0.49 (Anexo III, tabla 8). Sin embargo, los datos representados por WRF-ERA40 tienen una variabilidad media con un coeficiente de variación del 28% similar a E-OBS ( $CV_{E-OBS}=28\%$ ,  $CV_{SP02}=19\%$ ), y a otros modelos de ENSEMBLES, tales como CNRM, ETHZ o HC (Anexo I, tabla 8).

#### 4.1.2.3 Precipitación total anual en los días muy lluviosos

La precipitación total anual en los días lluviosos (R95PTOT) simulada por el modelo se encuentra entre 47.51 y 57.27 mm, estando dentro del rango de E-OBS y, de parte, de SP02 (Anexo I, tabla 9).

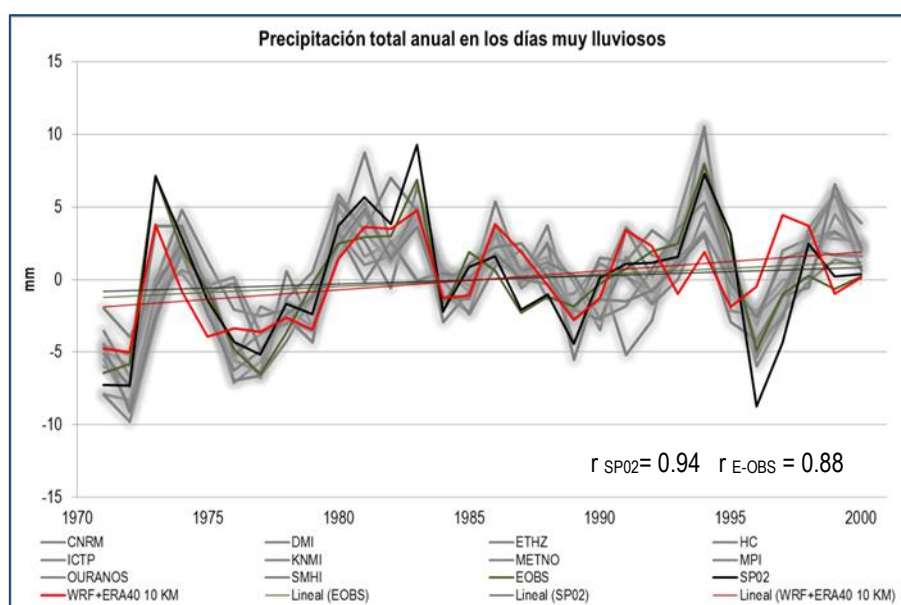


Figura 20. Anomalías de la precipitación total anual en los días muy lluviosos (R95PTOT) en el periodo de control

La figura 20 muestra las anomalías de la precipitación total anual en los días muy lluviosos, pudiéndose apreciar un aumento de la misma en todo el periodo de control. Los valores dados por WRF-ERA40 sobrestiman levemente los proporcionados por E-OBS con un valor del sesgo relativo del 0.5 %. Todo lo contrario ocurre con SP02 donde el sesgo es de un 21.5 % (Anexo II, tabla 2). Así, entre 1971 y 2000, E-OBS muestra un crecimiento aproximado de 2.5 mm, SP02 aumenta cerca de 2 mm y WRF-ERA40 alrededor de 5 mm. El modelo es el que mejor se ajusta a las observaciones como demuestran los altos coeficientes de correlación de WRF-ERA40 con respecto a SP02 y a E-OBS ( $R_{SP02} = 0.94$ ,  $R_{E-OBS}=0.88$ ), únicamente hay un modelo de



ENSEMBLES con una correlación tan alta, SMHI (Anexo III, tabla 9). En este caso WRF-ERA40 varía únicamente un 5.7% siendo el modelo con menor coeficiente de variación (Anexo I, tabla 9).

#### 4.1.2.4 Longitud de la racha húmeda

La longitud de la racha húmeda (CWD) proporcionada por WRF-ERA40 varía entre 7 y 12 días, un rango que está, en su mayor parte, dentro del dado por E-OBS y SP02. (Anexo I, tabla 10).

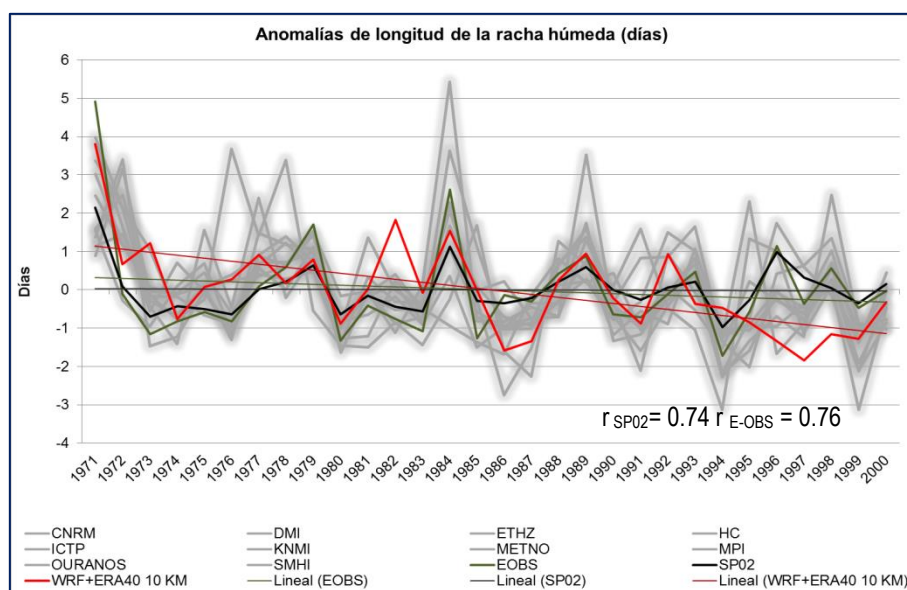
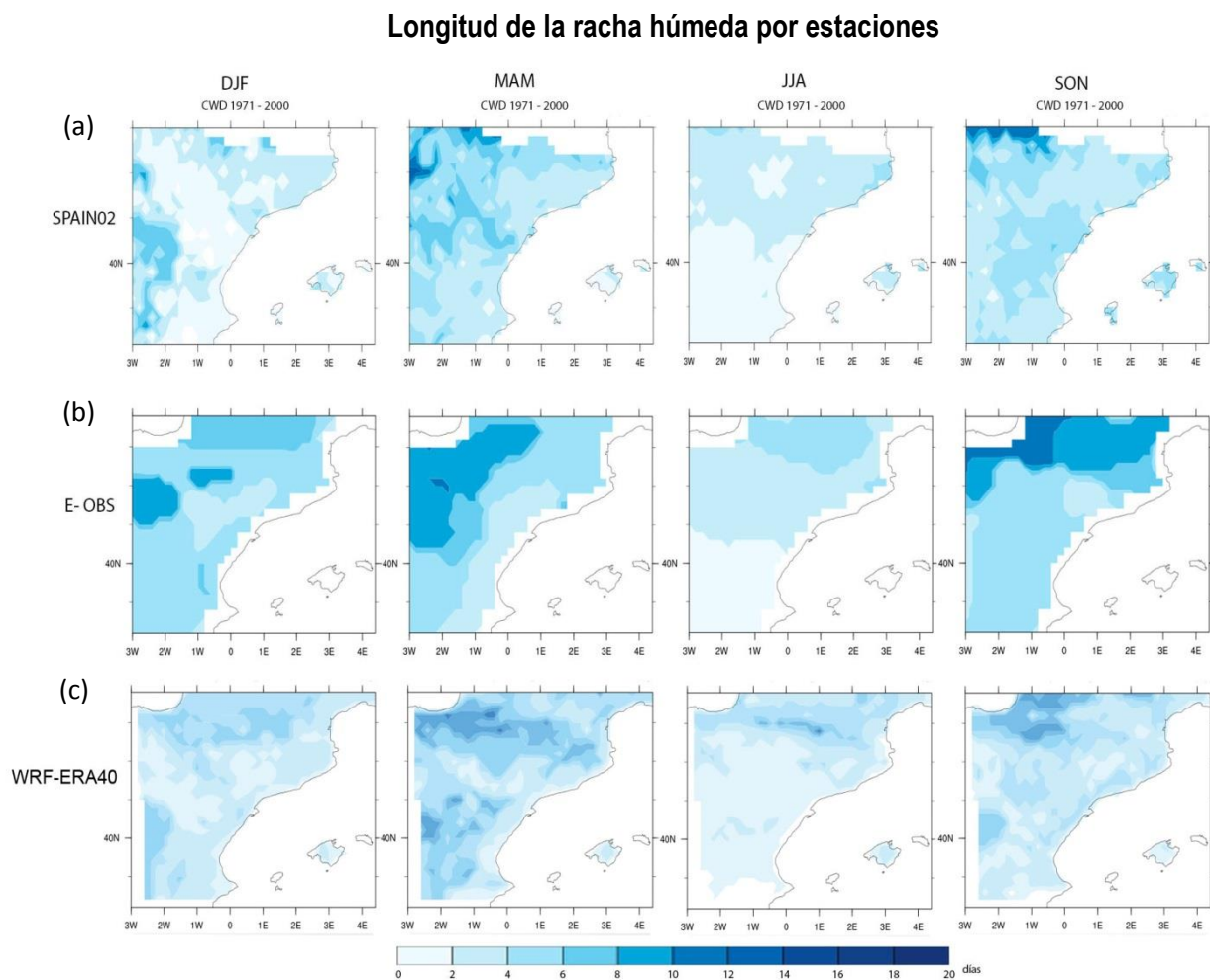


Figura 21. Anomalías de la longitud de la racha húmeda (CWD) para el período de control

En La figura 21 se aprecia una clara disminución de la longitud de la racha húmeda entre 1971 y 2000. WRF-ERA40 tiene unos valores que sobrestiman los suministrados, tanto por E-OBS como por SP02, contando con unos sesgos relativos de 31% y 54% respectivamente (Anexo II, tabla 2). La longitud de la racha húmeda según E-OBS disminuye ligeramente, sin llegar a 1 día, mientras que WRF-ERA40 muestra una disminución de 2 días entre 1971 y 2000. Por otra parte, SP02 muestra unos valores más o menos constantes durante todo el período de control. No obstante, hay una variabilidad moderada a lo largo de todo el período teniendo, WRF-ERA40, un coeficiente de variación de casi un 14% (Anexo I, tabla 10), similar a la variabilidad dada por las observaciones ( $CV_{E-OBS}=19.93\%$ ,  $CV_{SP02}=11.28\%$ ). Las correlaciones a lo largo de la zona de estudio del modelo con respecto a SP02 y a E-OBS son de las más altas, con unos valores de 0.74 y 0.76 respectivamente, superadas únicamente por tres modelos de ENSEMBLES (ETHZ,

METNO, MPI), por lo que el modelo se adecua bastante bien a las observaciones (Anexo III, tabla 10).

A continuación, la figura 22 representa espacialmente la longitud de la racha húmeda por estaciones medida por E-OBS, SP02 y por WRF-ERA40 en el período de control.



**Figura 22. Longitud de la racha húmeda por estaciones según (a) Spain02,(b) E-OBS y (c) WRF-ERA40, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)**

Las observaciones muestran que de las cuatro estaciones los valores de la longitud de la racha húmeda son mayores en primavera y en otoño. Así, en invierno se observa un máximo de, aproximadamente 10 días, tanto en E-OBS como en SP02, en puntos del Sistema Ibérico principalmente. Los valores mínimos se sitúan en zonas de la costa y la Cuenca del Ebro fundamentalmente. En primavera la longitud de la racha húmeda aumenta con respecto al invierno, ya que los valores máximos están entre 10 y 12 días, según E-OBS y SP02 respectivamente. Los máximos se sitúan en la zona vasca de Los Pirineos y en parte del



Sistema Ibérico, mientras que los valores mínimos se encuentran, principalmente, en la zona de la costa. En relación al verano, la longitud de la racha húmeda disminuye en comparación con la primavera y el invierno, aquí la longitud máxima es de 6 días en Los Pirineos y algún punto de la costa. El otoño es la estación en la que la longitud de la racha húmeda es mayor, estando el máximo entre 10 y 16 días en la zona del Pirineo, según E-OBS y SP02.

En WRF-ERA40 los valores de la longitud de la racha húmeda disminuyen con respecto a E-OBS y SP02, aunque los valores máximos se dan en primavera y en otoño. Esta relación estacional se mantiene en las observaciones, aunque E-OBS da valores ligeramente más altos que SP02.

En invierno la racha húmeda es mayor en algunos puntos del Pirineo y en el Sistema Ibérico, con un máximo de 6 días. La primavera es la estación con mayores valores ya que la longitud de la racha húmeda aumenta hasta llegar a un máximo de 16 días, en puntos del Pirineo. En verano sin embargo, disminuye alcanzando un máximo de 12 días en algún punto del Pirineo. El otoño es otra de las estaciones donde la racha húmeda aumenta, teniendo unos valores máximos de 14 días en la zona del Pirineo. En todas las estaciones los valores mínimos proporcionados por WRF-ERA40 se sitúan en la costa principalmente.

#### 4.1.2.5 Longitud de la racha seca

La longitud de la racha seca (CDD) derivada de WRF-ERA40 varía entre 20 y 51 días, teniendo un rango similar a los demás modelos de ENSEMBLES y algo menor que E-OBS y SP02 (Anexo I, tabla 11)

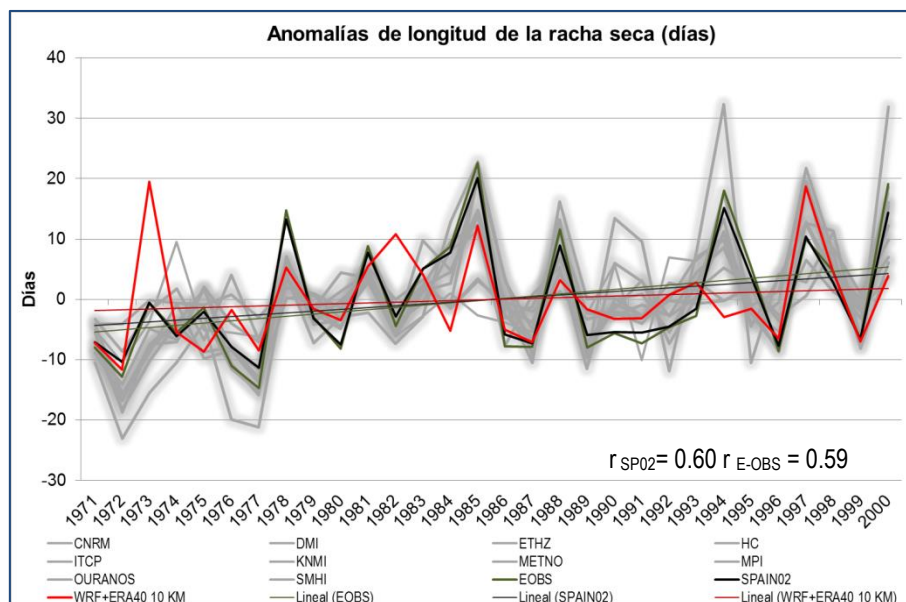


Figura 23. Anomalías de la longitud de la racha seca (CDD) para el período de control

La figura 23 representa las anomalías de la longitud de la racha seca observándose un claro aumento de los días secos consecutivos. El modelo subestima la longitud de la racha seca en comparación con las observaciones, especialmente con E-OBS cuyo sesgo relativo es un 21%, una subestimación mayor que en relación al SP02 cuyo sesgo es del 13% (Anexo II, tabla 2). Este índice aumenta cerca de 20 días según E-OBS, en SP02 el aumento es de, aproximadamente, 7 días y en WRF-ERA40 el incremento es de alrededor de 5 días. Sin embargo, WRF-ERA40 se ajusta peor a las observaciones, en comparación con otros índices, con unos coeficientes de correlación de cerca de 0.6. En este caso, se ajustan mejor otros modelos de ENSEMBLES (DMI, KNMI, METNO, MPI) con valores entre 0.7 y 0.9 (Anexo III, tabla 11). Asimismo, en este índice WRF-ERA40 varía más que los anteriores con un coeficiente de variación del 24%, aunque la variabilidad es similar a SP02, E-OBS ( $CV_{E-OBS}=25\%$ ,  $CV_{SP02}=24\%$ ), y los demás modelos de ENSEMBLES (Anexo I, tabla 11).

La figura 24 muestra la longitud de la racha seca por estaciones según las observaciones y WRF-ERA40

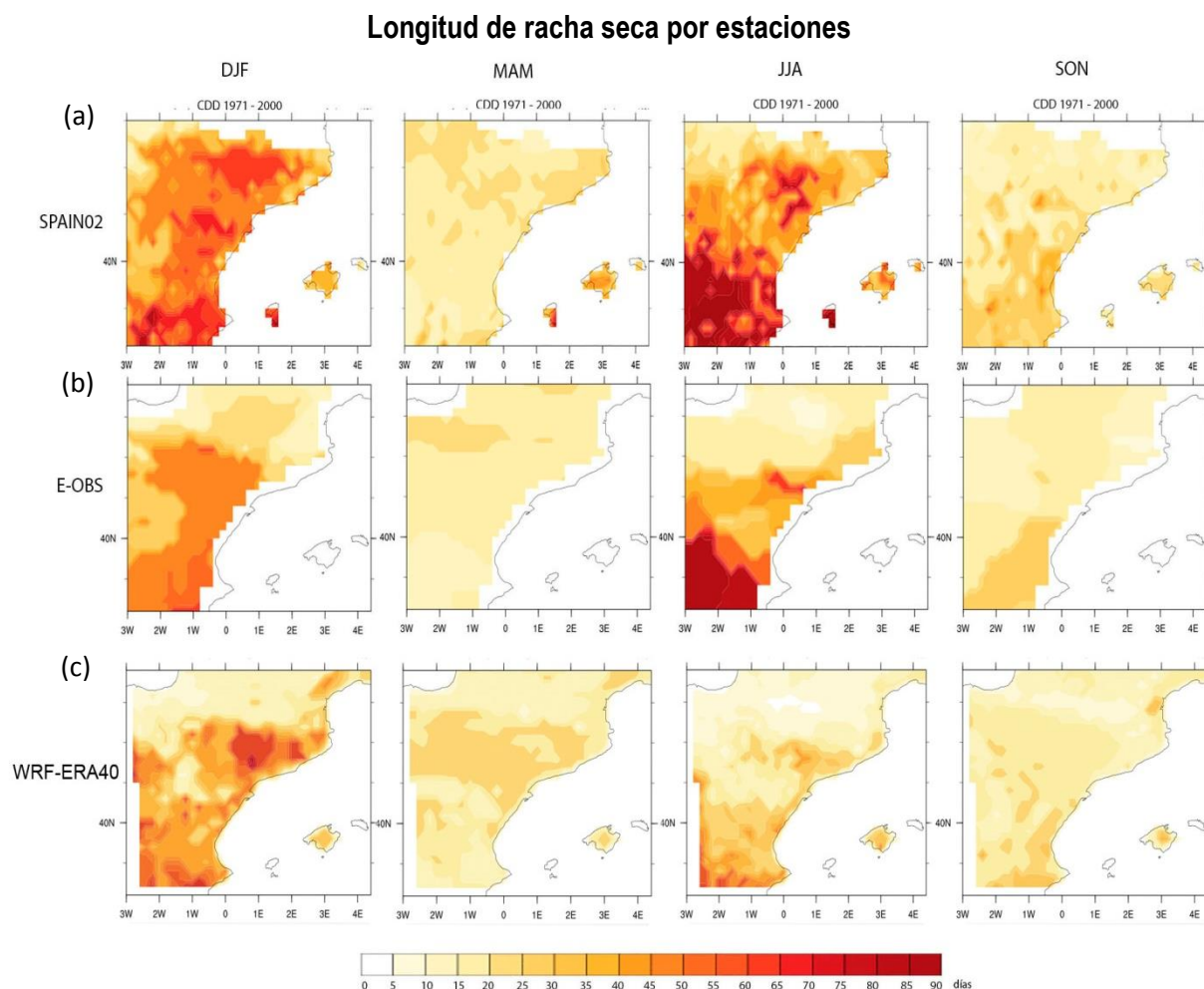


Figura 24. Longitud de la racha seca por estaciones según (a) Spain02, (b) E-OBS y (c) WRF-ERA40, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)

En oposición al índice anterior, la longitud de la racha seca es mayor en invierno y en verano tanto por parte de E-OBS y SP02 como por parte de WRF-ERA40. Así, en invierno los valores máximos de oscilan entre 35 y 60 días, según E-OBS y SP02 respectivamente, situándose, estos valores, fundamentalmente en la parte valenciana del Sistema Ibérico, así como en la Cuenca del Ebro y la zona sur del Pirineo. En primavera la racha seca tiene una disminución muy fuerte siendo el máximo según SP02 de 30 días en Baleares, y de 20 días según E-OBS en Los Pirineos. El verano es la estación con mayor duración de la racha seca en comparación con las demás estaciones. De forma que sus valores están entre 80 y 85 días localizándose en el Sistema Ibérico. En el paso del verano al otoño, la disminución es mucho más radical que entre

invierno y primavera, ya que en otoño el máximo está entre 20 y 25 días, según E-OBS y SP02 respectivamente, en el Sistema Ibérico y parte de la Cuenca del Ebro.

En el caso de WRF-ERA40, al igual que ocurre en las observaciones, el invierno es la estación con valores más altos en comparación con las demás estaciones. De modo que sus valores máximos oscilan entre 65 y 70 días en la Cuenca del Ebro, y puntos del Sistema Ibérico. En primavera la racha seca, además de tener valores mucho más pequeños que los que se dan en las observaciones, sufre una gran disminución estando el máximo en 25 días en la Cuenca del Ebro, parte de la costa y puntos del Sistema Ibérico. En verano este índice aumenta hasta un máximo de, aproximadamente, 55 días en el Sistema Ibérico y puntos de la costa valenciana. Por último, en otoño la longitud de la racha seca disminuye hasta alcanzar una duración máxima de 30 días en la costa valenciana y algún punto del Sistema Ibérico.

#### 4.1.3 Síntesis de la evaluación del modelo para el período de control

La tabla 6 resume los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas por WRF-ERA40 en el período de control.

Tabla 6. Tabla de síntesis de evaluación de los índices climáticos.

Índice	Tendencia	Variabilidad (SD o CV)	Sesgo (absoluto o relativo)	Coefficiente de correlación ( r )
<b>05pTN</b>	Incremento del percentil 5 de la temperatura mínima de 0.2°C según WRF-ERA40 y de 1°C según las observaciones.	Baja variabilidad: SD <sub>WRF-ERA40</sub> =0.89 SD <sub>E-OBS</sub> =1.13 SD <sub>SP02</sub> =0.89	WRF-ERA40 sobrestima las observaciones Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 1.28°C Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.02°C	Modelo y observaciones relacionadas año a año. r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.78 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.74
<b>95pTX</b>	Incremento del percentil 95 de la temperatura máxima de 1°C según WRF-ERA40, E-OBS y SP02	Baja variabilidad: SD <sub>WRF-ERA40</sub> =1.08 SD <sub>E-OBS</sub> =1.17 SD <sub>SP02</sub> =1.16	WRF-ERA40 subestima las observaciones: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : -5.79°C Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -4.74°C	WRF-ERA y observaciones relacionadas año a año. r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.88 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.88
<b>ETR</b>	Incremento del rango de temperaturas extremas DE 0.8°C según E-OBS y de 1°C según WRF-ERA40. SP02 se mantiene más o menos constante.	Baja variabilidad: SD <sub>WRF-ERA40</sub> =2.47 SD <sub>E-OBS</sub> =1.78 SD <sub>SP02</sub> =1.55	WRF-ERA40 sobrestima las observaciones: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 3.43 °C Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 3.80 °C	WRF-ERA40 se ajusta bien a las observaciones: r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.97 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.92
<b>HWDI</b>	Incremento general de las olas de calor de 4 días según WRF-ERA40 y SP02. E-OBS se mantiene más o menos constante.	Gran variabilidad: SD <sub>WRF-ERA40</sub> =10.35 SD <sub>E-OBS</sub> =10.22 SD <sub>SP02</sub> =9.22	WRF-ERA40 subestima las observaciones: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : -5 d Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -3.6 d	WRF-ERA40 se ajusta bien a las observaciones: r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.91 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.90
<b>FD</b>	Disminución de los días de helada de 20 días según SP02 y E-OBS y de 10 días según WRF-ERA40. Mayor disminución de invierno a primavera.	Gran variabilidad : SD <sub>WRF-ERA40</sub> =9.23 SD <sub>E-OBS</sub> =10.62 SD <sub>SP02</sub> =10.22	WRF-ERA40 subestima las observaciones Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : -8.2 d Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -7.6 d	WRF-ERA40 y observaciones relacionados: r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.74 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.81
<b>TR</b>	Incremento de las noches tropicales de 1 día según WRF-ERA40, de 5 días según E-OBS y de 10 días según SP02. Mayor incremento de primavera a verano	Variabilidad moderada: SD <sub>WRF-ERA40</sub> =2.32 SD <sub>E-OBS</sub> =2.33 SD <sub>SP02</sub> =3.85	WRF-ERA40 sobrestima E-OBS y subestima SP02: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.91 d Sesgoabs <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -6.39d	Buena adaptación del modelo a las observaciones: r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.79 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.65
<b>RX1DAY</b>	Disminución del máximo de precipitación diaria de 2 mm/d según E-OBS, 6mm/d según SP02 y 10 mm/d según WRF-ERA40.	Gran variabilidad: CV <sub>WRF-ERA40</sub> : 17% CV <sub>E-OBS</sub> : 17% CV <sub>SP02</sub> : 13%	WRF-ERA40 subestima las observaciones Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : -3% Sesgo <sub>rel</sub> <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -30%	Baja relación del modelo con respecto a las observaciones r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.50 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.45
<b>R20mm</b>	Disminución de los días de precipitación abundante de 1 día según las observaciones y de 3 días según WRF-ERA40	Gran variabilidad: CV <sub>WRF-ERA40</sub> : 28% CV <sub>E-OBS</sub> : 28% CV <sub>SP02</sub> : 19%	WRF-ERA40 sobrestima E-OBS y subestima SP02: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 30% Sesgo <sub>rel</sub> <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : -3%	Baja relación del modelo con respecto a las observaciones r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.60 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.49

índice	Tendencia	Variabilidad (SD o CV)	Sesgo (absoluto o relativo)	Coefficiente de correlación ( R )
<b>R95PTOT</b>	Incremento de la precipitación total anual en los días muy lluviosos de 2.5 mm según E-OBS, de 2 mm según SP02 y de 5 mm según WRF-ERA40	Baja variabilidad: CV <sub>WRF-ERA40</sub> : 5.72% CV <sub>E-OBS</sub> : 7.14% CV <sub>SP02</sub> : 6.63%	El modelo sobrestima los las observaciones: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.5% Sesgo <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 21.5%	Buena adaptación del modelo a las observaciones R <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.94 R <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.88
<b>CWD</b>	Disminución de la longitud de la racha húmeda de 1 día según E-OBS y de 2 días según WRF-ERA40. SP02 se mantiene más o menos constante. Mayor longitud de la racha húmeda en primavera y en otoño	Gran variabilidad: CV <sub>WRF-ERA40</sub> : 13.78% CV <sub>E-OBS</sub> : 19.93% CV <sub>SP02</sub> : 11.28%	El modelo sobrestima las observaciones: Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 31% Sesgo <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 54%	Buena adaptación del modelo a las observaciones: r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.74 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.76
<b>CDD</b>	Incremento de la longitud de la racha seca de 20 días según E-OBS, de 7 días según SP02 y de 5 días según WRF-ERA40.	Gran variabilidad: CV <sub>WRF-ERA40</sub> : 24% CV <sub>E-OBS</sub> : 25% CV <sub>SP02</sub> : 24%	El modelo subestima por las observaciones Sesgo <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 21% Sesgo <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 13%	Baja relación del modelo con respecto a las observaciones r <sub>WRF-ERA vs SP02</sub> : 0.60 r <sub>WRF-ERA vs E-OBS</sub> : 0.59

## 4.2 Proyecciones de los índices climáticos para 2001-2050

En este apartado se presentan los índices de temperatura y precipitación sobre la zona de estudio proyectados para el período 2001-2050 con respecto al período de control (1971-2000). Los índices se han calculado basándose en el escenario A1B, utilizando dos simulaciones diferentes del modelo global ECHAM5 (WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3) como condiciones de contorno que hará que los resultados sean diferentes según la simulación.

En el caso de las proyecciones, se representa geográficamente la diferencia estacional entre los períodos 2021-2050 y 1971-2000 de los días de helada, noches tropicales, longitud de racha húmeda y longitud de racha seca, con el fin de analizar donde se producirán los cambios más significativos con respecto al período de control. Debido a esto, se ha calculado el estadístico t-student a un 95% de confianza. La t-student se utiliza para comparar si hay diferencias significativas entre los períodos, 2021-2050 y 1971-2000, refiriéndose, con diferencias significativas a que hay evidencias estadísticas de que ambos períodos difieren entre sí y que las diferencias no se deben al azar.

En relación al análisis temporal los estadísticos más importantes son aquellos en relación a la variabilidad de los modelos, es decir, la desviación típica y el coeficiente de variación. De tal manera, que además de calcularse la desviación típica y el coeficiente de variación para el

período desde 1971 hasta 2050 con el fin de ver la variabilidad de los índices en todo el período, también se han calculado por separado, para poder observar si la han variado más en los últimos años del siglo XX, o por el contrario, las proyecciones muestran una variabilidad mayor.

#### 4.2.1 Proyección de índices de temperatura

##### 4.2.1.1 Percentil 5 de la temperatura mínima

El percentil 5 de la temperatura mínima es diferente según la simulación. Así, los valores dados por WRF-ECHAM5s1 están entre -3.12 y 1.73 °C y los de WRF-ECHAM5s3 varían entre -2.15 y 2.62. Sin embargo, los modelos de ENSEMBLES muestran un rango mucho mayor encontrándose entre -4.72 y 3.04 °C (ANEXO VI, Tabla 1).

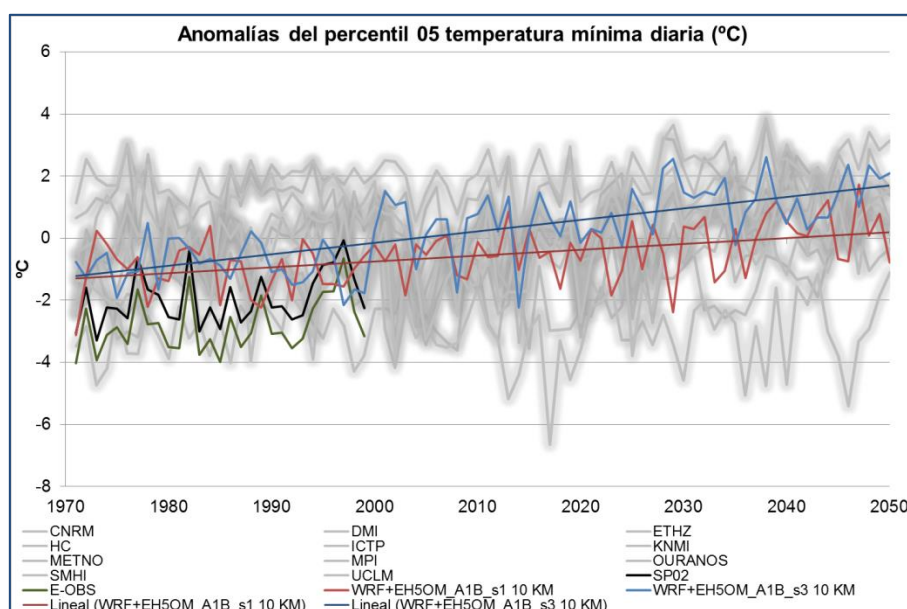


Figura 25. Anomalías de 05pTN entre 1971-2050 para el escenario A1B

La figura 25 representa las anomalías del percentil 5 de la temperatura mínima entre 1971 y 2050 pudiéndose observar un incremento, tanto en ambas simulaciones de WRF-ECHAM5 como en los modelos de ENSEMBLES. De manera que WRF-ECHAMs1 proyecta un aumento de alrededor de 3°C, y WRF-ECHAMs3 de aproximadamente 1.5°C entre 1971 y 2050. Asimismo, la desviación típica muestra mayor variabilidad en la primera mitad del siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAMs1} = 0.88$ ,  $SD_{WRF-ECHAMs3} = 0.99$ ) que en los últimos 30 años del siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAMs1} = 0.82$ ,  $SD_{WRF-ECHAMs3} = 0.69$ ) para las dos simulaciones. Este resultado es coherente con lo que



muestran la mayoría de los modelos de ENSEMBLES, a excepción de SMHI y MPI (Anexo V, Tabla 1).

#### 4.2.1.2 Percentil 95 de la temperatura máxima

En relación al percentil 95 de la temperatura máxima, su rango está entre 23.50 y 29.21 °C para WRF-ECHAM5s1 y entre 24.96 y 30.08°C para WRF-ECHAM5s3. El rango de los modelos de ENSEMBLES es mayor oscilando, en general, entre 24.32 y 36.50 °C, esto se debe fundamentalmente al modelo OURANOS cuya proyección se desvía del resto de los modelos (Anexo IV, Tabla 2).

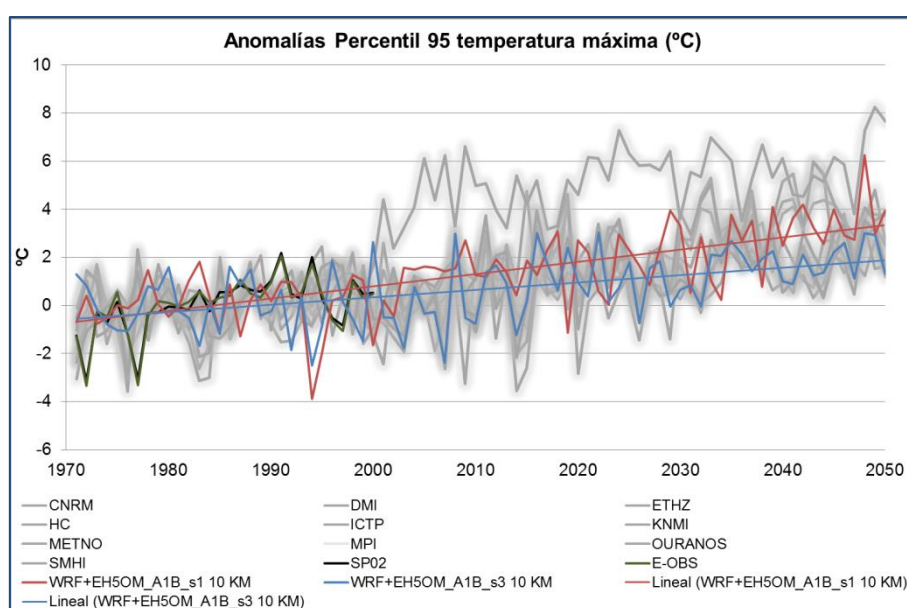


Figura 26. Anomalías del percentil 95 de la temperatura máxima entre 1971 – 2050 para el escenario A1B

La figura 26 muestra las anomalías del percentil 95 de la temperatura máxima en el período 1971 – 2050. Se puede apreciar un aumento por parte tanto las simulaciones de WRF-ECHAM5 como por parte de los modelos de ENSEMBLES. De tal forma que este índice en WRF-ECHAMs1 puede aumentar hasta 4.5 °C, mientras que WRF-ECHAMs3 predice un aumento de alrededor de 2°C entre 1971 y 2050. Al igual que el anterior, la variabilidad dada por la desviación típica de WRF-ECHAM5 es mayor en la primera mitad del siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAMs1} = 1.40$ ,  $SD_{WRF-ECHAMs3} = 1.30$ ) que en la segunda mitad del siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAMs1} = 1.16$ ,  $SD_{WRF-ECHAMs3} = 1.21$ ), siendo análogo, este resultado, con lo que ocurre en la mayoría de modelos de ENSEMBLES, exceptuando los modelos HC y METNO (ANEXO V, tabla 1).



### 4.2.1.3 Rango de temperaturas extremas

Respecto al rango de temperaturas extremas, tiene rangos parecidos en ambas simulaciones, estando WRF-ECHAM5s1 entre 16.30 y 25.16 °C y WRF-ECHAM5s3 entre 16.47 y 26.75 °C. Sin embargo los modelos de ENSEMBLES se mueven en un rango mayor, entre 12.10 y 27.40 °C (Anexo IV, Tabla 3).

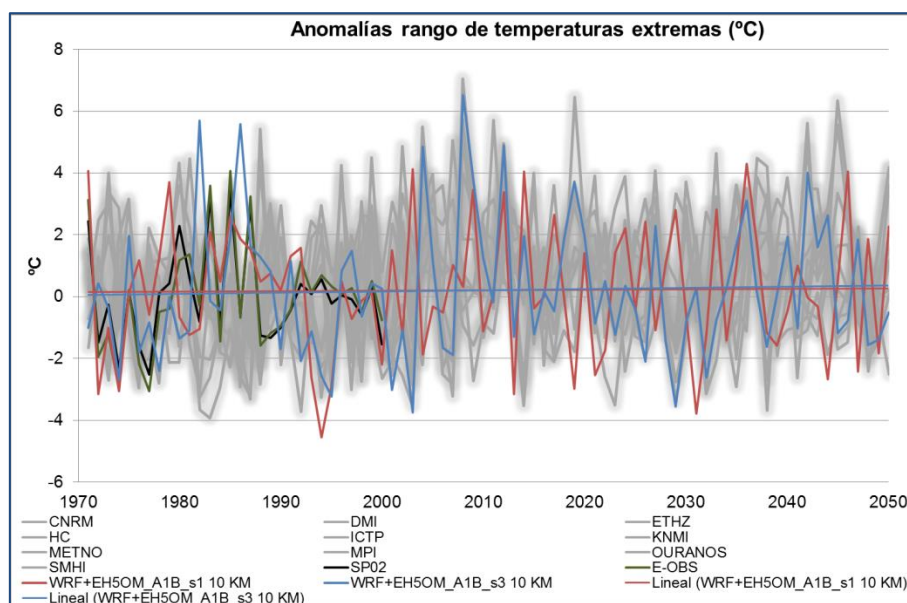


Figura 27. Anomalías del rango de temperaturas extremas (ETR) entre 1971 -2050 para el escenario A1B

En la figura 27 se observan las anomalías del rango de temperaturas extremas en el período de 1971 a 2050. La gráfica revela cierta tendencia al aumento por parte de WRF-ECHAM5s3, aumentando cerca de 0.2°C entre 1971 y 2050, mientras que WRF-ECHAM5s1 permanece prácticamente constante durante todo ese período. Este índice tiene una variabilidad mucho más grande que los anteriores, aunque de la misma manera, varía más en la primera mitad del siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 2.10$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 2.26$ ) que en los últimos años del siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 2.04$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 2.10$ ). Asimismo, las simulaciones de WRF-ECHAM5 tienen mayor desviación típica que la mayoría de los modelos de ENSEMBLES, a excepción de ETHZ, HC, ICTP y KNMI (Anexo V, tabla 1)

#### 4.2.1.4 Índice de duración de las olas de calor

Según las proyecciones realizadas por WRF-ECHAM5s1 la duración de las olas de calor están en un rango entre 43 y 104 días al año, para el período de 1971-2050, mientras que en WRF-ECHAM5s3 está entre 45 y 99 días al año, para el mismo período. Asimismo, las según proyecciones de los modelos de ENSEMBLES este índice se encuentra entre 43 y 117 días al año en para todo el período (Anexo IV, Tabla 4).

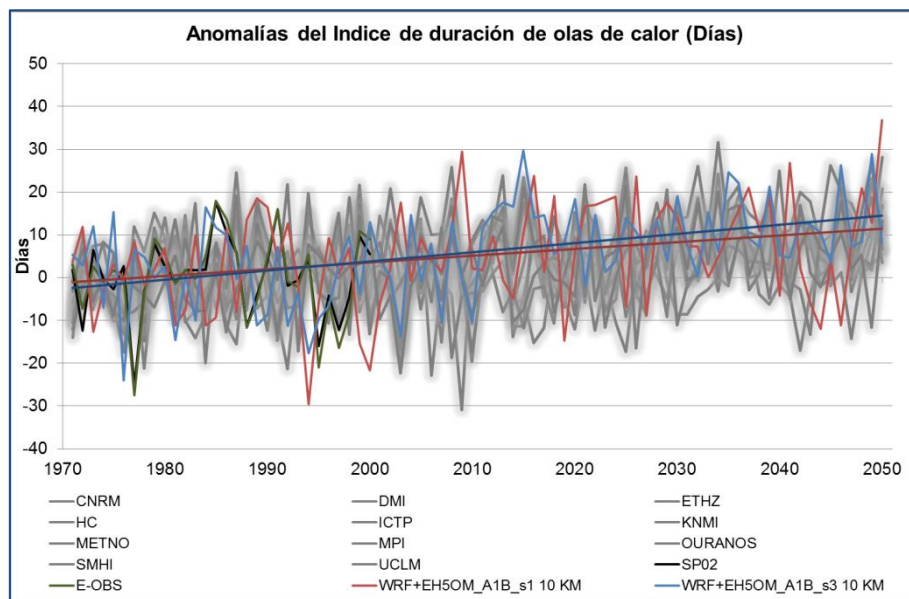


Figura 28. Anomalías del índice de duración de olas de calor (HWDI) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

La figura 28 muestra un claro aumento en la duración de las olas de calor tanto para WRF-ECHAM5 como para los modelos de ENSEMBLES. Así, WRF-ECHAMs1 predice un aumento aproximado de 4.5 días, mientras que WRF-ECHAMs3 proyecta un aumento mucho mayor, de alrededor de 16 días entre 1971 y 2050. La desviación típica evidencia que las dos simulaciones de WRF-ECHAM5 son las que más varían en comparación con los demás modelos. Aunque en este caso WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 difieren en cuanto a su variabilidad para el siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAM5s1}=11.45$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3}= 9.32$ ) y para el siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 11.54$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3}=10.35$ ), no siguiendo WRF-ECHAM5s3 la tendencia de otros modelos de ENSEMBLES (Anexo V, tabla 1).

#### 4.2.1.5 Días de helada

El rango de los días es similar para ambas simulaciones estando WRF-ECHAM5s1 entre 13 y 63 días y WRF-ECHAM5s3 entre 11y 54 días. El conjunto de modelos de ENSEMBLES, sin embargo, se mueven entre 3 y 137 días, este rango tan amplio se debe, fundamentalmente, a los modelos MPI y OURANOS (Anexo IV, Tabla 5).

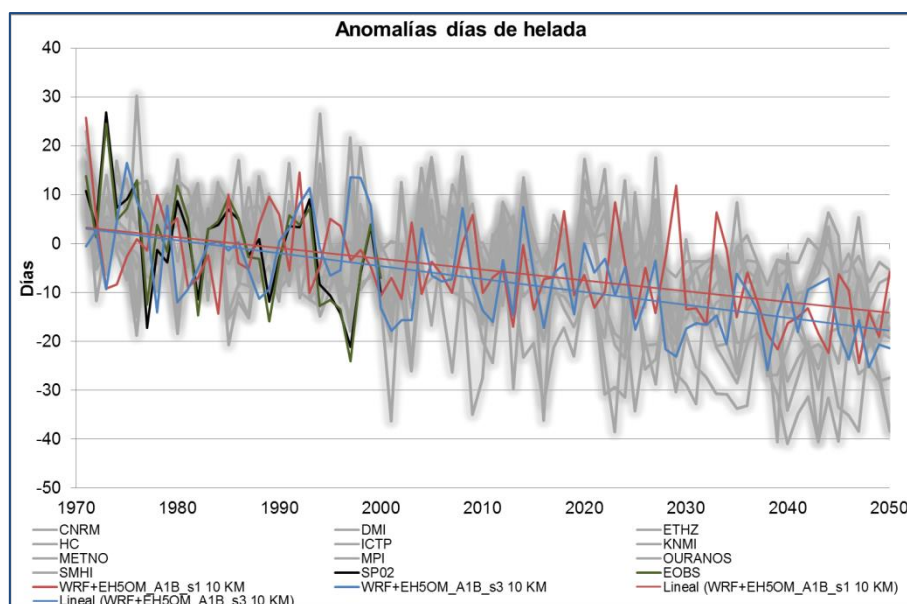


Figura 29. Anomalías de días de helada (FD) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

La figura 29 refleja las anomalías de los días de helada entre 1971 y 2050, se observa una gran disminución de los mismos que se acentúa en la primera mitad del siglo XXI. De manera que WRF-ECHAM5s1 proyecta una disminución de alrededor de 19 días, mientras que en WRF-ECHAM5s3 disminuyen aproximadamente 17 días en todo el período. En este caso WRF-ECHAM5 no es coherente, en cuanto a la variabilidad, con respecto a los modelos de ENSEMBLES ya que su desviación típica es mayor en el siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 8.66$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 8.53$ ) que en el siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 8.23$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 7.87$ ). WRF-ECHAM5 está entre los modelos con menor variación detrás de los modelos DMI y MPI de ENSEMBLES (Anexo V, Tabla 1).

La figura 30 representa la diferencia estacional de los días de helada para (a) el período entre 1971-2000 y (b) las diferencias entre los períodos de 2021-2050 y 1971-2000 para ambas simulaciones de WRF-ECHAM5.

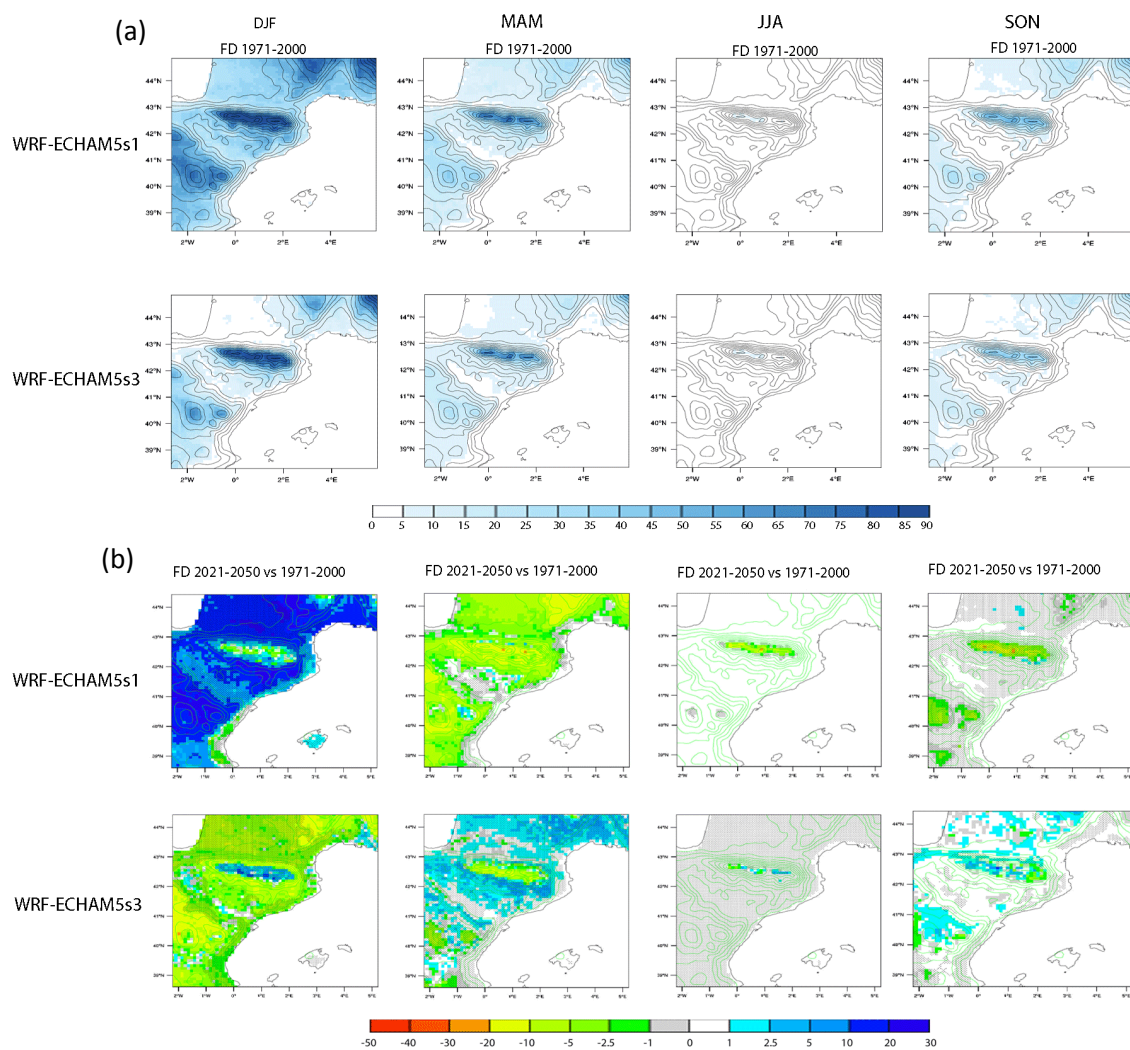


Figura 30. (a) días de helada simulados por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 entre 1971-2000 en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA), otoño (SON) y (b) Proyecciones de días de helada entre 2021-2050 vs 1971-2000 por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)

En relación con la simulación de este índice para el período entre 1971 y 2000 por parte de WRF-ECHAM5 se observa que ambas simulaciones dan resultados similares. De manera que, en ambos casos la estación con más días de helada es invierno cuyo valor máximo esta entre 75 y 80 días en los Pirineos principalmente, aunque también se dan valores altos en el Sistema Ibérico. Después del invierno la estación que mayores valores tiene es la primavera, aunque en este caso WRF-ECHAM5s3 da un valor máximo aproximado de 50 días de helada frente a los 40 días de WRF-ECHAM5s1. Geográficamente, los mayores valores se encuentran en los Pirineos y en algunos puntos del Sistema Ibérico. En relación al verano ninguna de las simulaciones proporciona días de helada. Por último, en otoño el valor máximo que se puede alcanzar con respecto a este índice es de 20 días en la zona pirenaica y el Sistema Ibérico. En todas las estaciones los menores valores se localizan en la Cuenca del Ebro y la costa.

Con respecto a las proyecciones la figura 31(b) muestra tanto los días de helada, entre 2021-2050 vs 1971-2000, como el test estadístico t-student. En general en las proyecciones se puede apreciar que los resultados difieren si se comparan las simulaciones realizadas por WRF-ECHAM5 en el período de control con las proyecciones. Así, en invierno WRF-ECHAM5s1 muestra un aumento, de hasta 10 días, en el Sistema Ibérico, en la cuenca del Ebro y en alguna zona del Pirineo. Sin embargo, en parte de Los Pirineos y en la costa se muestra una disminución de hasta 2.5 días. Por el contrario, WRF-ECHAM5s3 muestra un aumento de hasta 5 días en los pirineos y una disminución generalizada en la costa y en el interior, asemejándose más a la simulación realizada, por WRF-ECHAMs3, en el período de control.

En primavera los días de helada disminuyen, según WRF-ECHAM5s1, especialmente en el Sistema Ibérico y en la zona del Pirineo un máximo de 10 días. Mientras que en WRF-ECHAM5s3 aumentan hasta 5 días en la Cuenca del Ebro y en parte del Pirineo, pero al igual que WRF-ECHAM5s1, disminuyen, hasta 5 días, en algunos puntos del Sistema Ibérico y en el Pirineo.

En verano hay una disminución generalizada tanto en las simulaciones realizadas en el siglo XX, ya que en ninguna de las dos se dan días de helada, como en las proyecciones. De manera que ambas simulaciones proyectan una disminución generalizada de los días de helada únicamente en el Pirineo. De forma que WRF-ECHAMs1 proyecta una disminución máxima de 20 días, mientras que según WRF-ECHAMs3 los días de helada varían entre -2.5 y 2.5 días.

Por último en otoño, tanto WRF-ECHAM5s1 como WRF-ECHAM5s3 se dan, en el siglo XX, unos máximos de 15 días en la zona del Pirineo y del Sistema Ibérico. Con respecto a las proyecciones WRF-ECHAM5s1 predice una disminución de hasta 10 días en el Pirineo y algunos puntos del Sistema Ibérico. Sin embargo, en WRF-ECHAM5s3 se observa que en la mayor parte de la zona del Pirineo los días de helada aumentan hasta 5 días, aunque en el extremo este del Pirineo y puntos del Sistema Ibérico disminuyen hasta 2.5 días. Ambas simulaciones muestran diferencias estadísticamente significativas entre ambos períodos, 2021–2050 y 1971–2000, especialmente en la costa y en el interior para todas las estaciones. No obstante, en WRF-ECHAM5s3 las diferencias son algo mayores.

#### 4.2.1.6 Noches Tropicales

Las noches tropicales proyectadas por ENSEMBLES varían en un rango mayor que las proyectadas por WRF-ECHAM5. De tal manera que los modelos de ENSEMBLES varían entre 0 y 65 días al año, WRF-ECHAM5s1 está entre 0 y 35 días al año y WRF-ECHAM5s3 entre 0 y 39 días al año. (Anexo IV, Tabla 6).

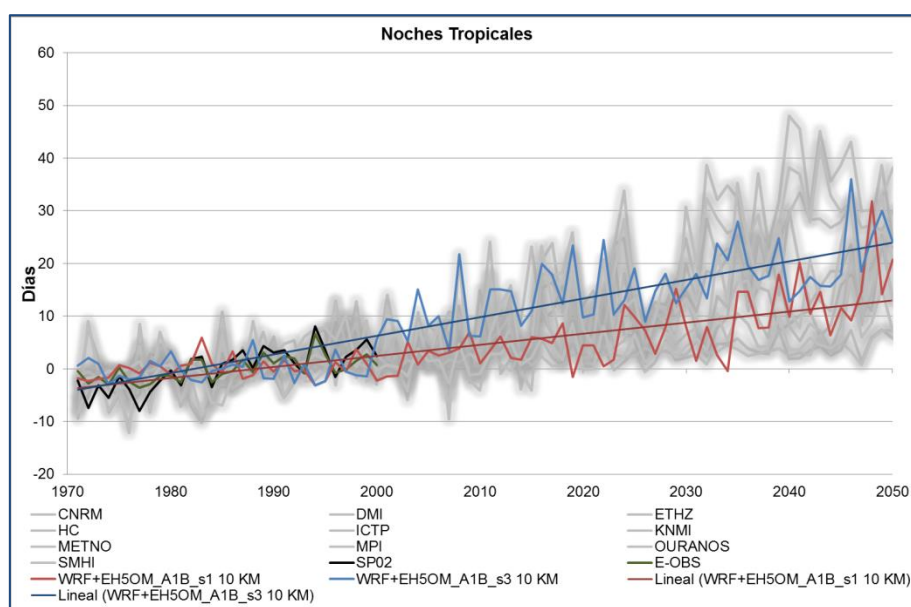


Figura 31. Anomalías de las noches tropicales (TN) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

La figura 31 muestra las anomalías de las noches tropicales entre 1971 y 2050. Se observa un claro aumento de las mismas, especialmente en la primera mitad del siglo XXI. De forma que WRF-ECHAM5s3 proyecta un aumento de casi 28 días, siendo mayor que el proyectado por WRF-ECHAM5s1 en el cuál, las noches tropicales aumentan alrededor de 15 días en todo el período. En este caso todos los modelos tienen una variabilidad mucho mayor en la primera mitad del siglo XXI ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 6.62$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 6.74$ ) que a finales del siglo XX ( $SD_{WRF-ECHAM5s1} = 1.99$ ,  $SD_{WRF-ECHAM5s3} = 2.38$ ). Los modelos de ENSEMBLES tienen una variación mucho mayor en comparación con WRF-ECHAM5, con algunas excepciones como ICTP, OURANOS y SMHI (Anexo V, Tabla 1).

La figura 32 representa la diferencia estacional de las noches tropicales para (a) para el período entre 1971-2000 simulado por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 y (b) las diferencias estacionales entre los períodos de 2021-2050 y 1971-2000 para WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3.



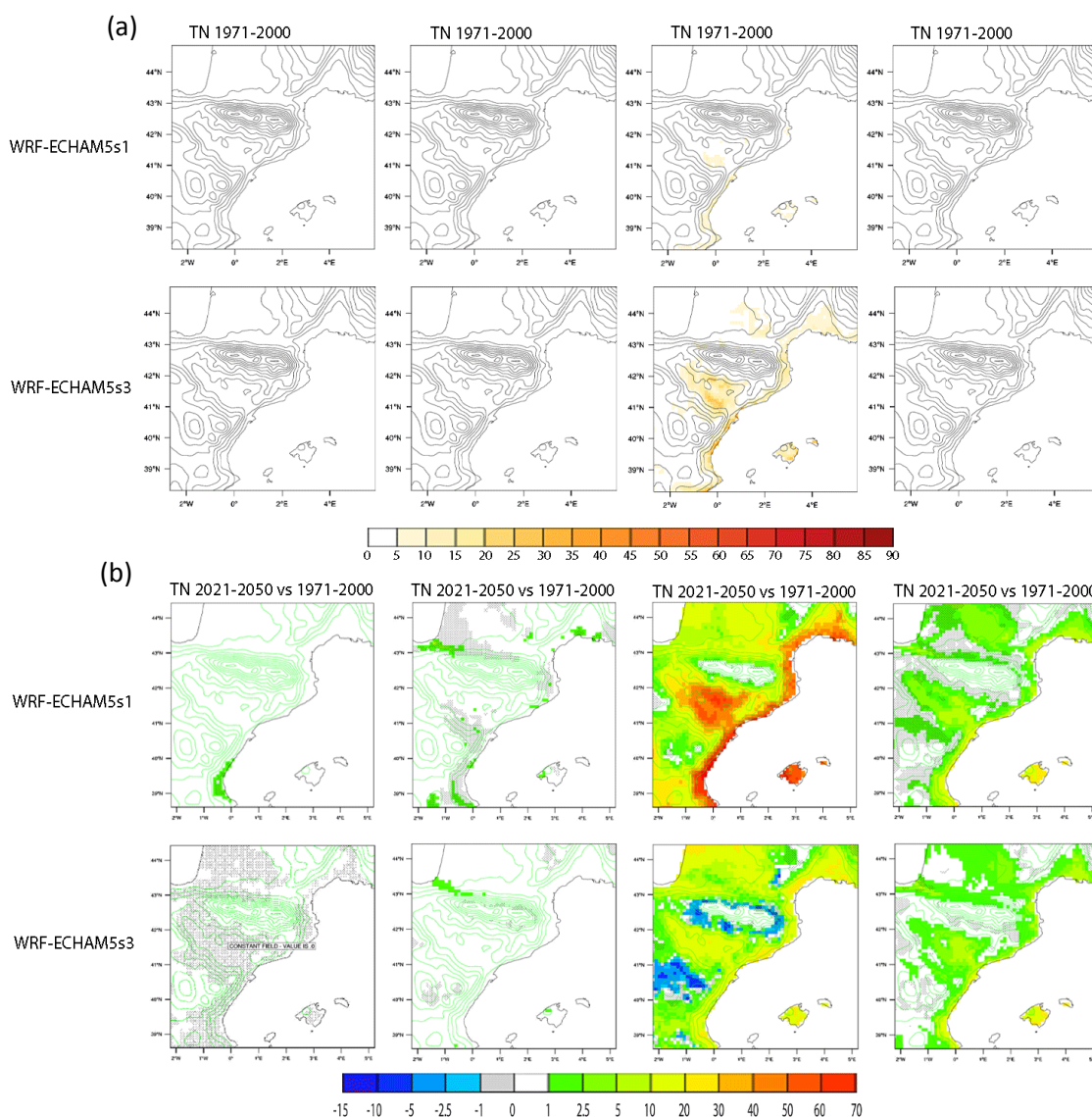


Figura 32. (a) Noches tropicales simuladas por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 entre 1971-2000, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON) y (b) Proyecciones de noches tropicales entre 2021-2050 vs 1971-2000 por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)

Con respecto a la simulación realizada en el período de control con WRF-ECHAM5 se puede observar que en ambas simulaciones se dan noches tropicales únicamente en verano. De forma que WRF-ECHAM5s1 tiene valores máximos de 5 días en la costa, la cuenca del Ebro y Baleares, mientras que WRF-ECHAM5s3 da valores mayores estando los máximos entre 25 y 30 días. Con respecto al resto de estaciones, ninguna de las simulaciones muestra valores.

En relación a las proyecciones, la figura 32 representa tanto las noches tropicales por estaciones, en el período 2021-2050 con respecto al 1971-2000, como el test estadístico

t-student. Los resultados proyectados se asemejan a los valores mostrados por las simulaciones hechas por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 para finales del siglo XX. Por tanto, en invierno WRF-ECHAM5s1 muestra un pequeño aumento en una zona de la costa valenciana de 2.5 días, mientras que en WRF-ECHAM5s3 no se observa aumento alguno. Sin embargo, al contrario que en WRF-ECHAM5s1, en WRF-ECHAM5s3 hay diferencias estadísticamente significativas en la mayor parte de la zona de estudio, excepto en las zonas montañosas.

En primavera las noches tropicales proyectadas por WRF-ECHAM5s1 aumentan un máximo de 2.5 días en la zona vasca de los Pirineos y de la costa valenciana, donde también se observan diferencias estadísticamente significativas. Entretanto, para WRF-ECHAM5s3 este aumento se localiza en algún punto del Pirineo y de Baleares, en este caso las diferencias significativas son mucho menores que en invierno.

Asimismo, en verano WRF-ECHAM5s1 proyecta un aumento máximo de 60 noches tropicales en toda la zona, especialmente en la costa y Baleares. Por otra parte, en WRF-ECHAM5s3 el aumento es algo menor, hasta 30 días, en el interior y en la costa, pero en las zonas montañosas se proyecta una disminución máxima de 5 días. En ambas simulaciones hay diferencias estadísticamente significativas en algunos puntos del Sistema Ibérico.

Por último, en otoño ambas simulaciones predicen un aumento máximo de 20 días en el interior, en la costa y en Baleares. En las zonas montañosas no se da aumento alguno, aunque hay diferencias estadísticamente significativas entre ambos períodos, especialmente en WRF-ECHAM5s1.



## 4.2.2 Proyección de índices de precipitación

A continuación se analizan las proyecciones de los índices de precipitación seleccionados para el período 1971 – 2050.

### 4.2.2.1 Máximo de precipitación en 1 día

Los valores del máximo de precipitación en un día proporcionados por WRF-ECHAM5s1 están entre 46.92 y 98.48 mm/día, muy similares a los de WRF-ECHAM5s3 que se encuentran entre 45.01 y 83.46 mm/día entre 1971 y 2050. No obstante, los modelos de ENSEMBLES tienen un rango mayor estando entre 12.46 y 88.27 mm/día (Anexo IV, Tabla 7).

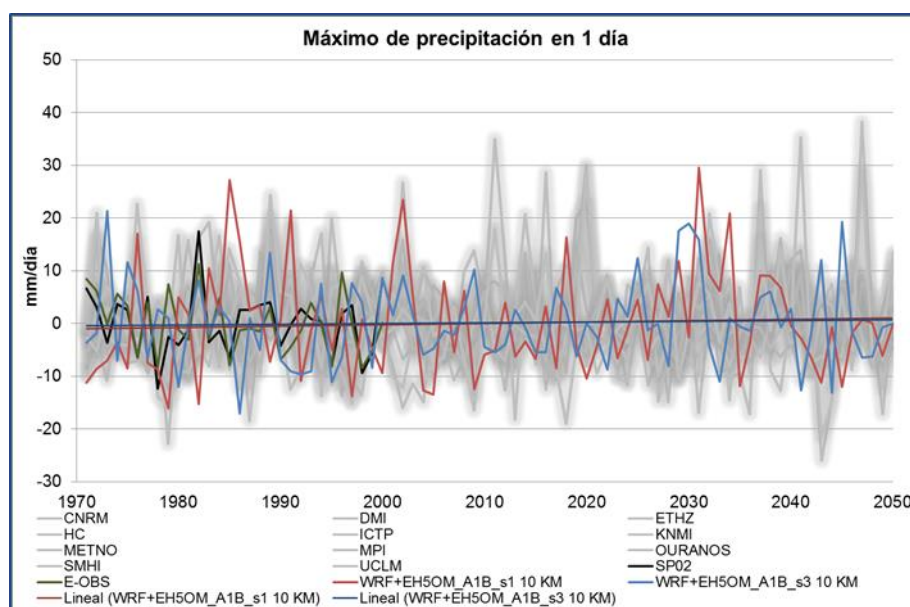


Figura 33. Anomalías del máximo de precipitación en un día (RX1DAY) entre 1971-2050 para el escenario A1B

En la figura 33 se representa la evolución temporal de las anomalías del máximo de precipitación en un día para el período entre 1971 – 2050. Se observa un aumento muy sutil de este índice, de forma que para ambas simulaciones de WRF-ECHAM5 el aumento está entre 0.1 y 0.2 mm/día en todo el período. Se puede considerar que el máximo de precipitación en 1 día permanece prácticamente constante durante todo el período, ya que su aumento no llega a 1 día. Este crecimiento se da principalmente en el siglo XX, en la primera mitad del siglo XXI el máximo de precipitación diaria se mantiene más o menos constante. Así, el modelo WRF-ECHAM5 varía algo más en los últimos años del siglo XX ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 17\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 14\%$ ) que en

la primera mitad del siglo XXI ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 15\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 12\%$ ), al contrario que en ENSEMBLES donde la mayoría de los modelos varían más en la primera mitad del siglo XXI, exceptuando DMI, ICTP, KNMI y SMHI (Anexo V, Tabla 2).

#### 4.2.2.2 Días de precipitación abundante

Los valores entre los que varían los días de precipitación abundante están entre 9 y 20 días para WRF-ECHAM5s1 y entre 8 y 19 días para WRF-ECHAM5s3, siendo estos similares para el conjunto de modelos que forman el proyecto ENSEMBLES cuyo rango está entre 0 y 19 días, estos valores mínimos se deben principalmente al modelo HC (Anexo IV, Tabla 8).

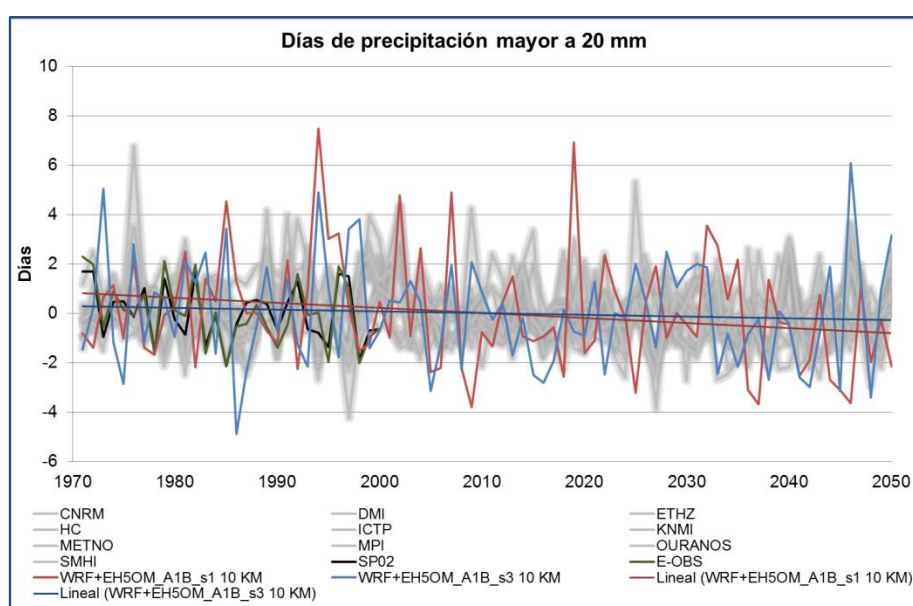


Figura 34. Anomalías de los días de precipitación abundante (R20mm) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

La figura 34 representa evolución entre 1971 y 2050 de las anomalías de los días de precipitación abundante, pudiéndose observar una disminución en todo el período tanto para los modelos de ENSEMBLES como para el WRF-ECHAM5. De modo que WRF-ECHAM5s1 disminuye en 0.5 días aproximadamente y WRF-ECHAM5s3 proyecta una disminución de cerca de 2 días. Así, se proyectan picos máximos para los años 2019 y 2046. Asimismo, se puede observar los dos picos mínimos correspondientes a los años 2005 y 2008 coinciden con dos años de grandes sequías en Cataluña (Agència Catalana de l'Aigua, 2005, 2008). Al igual que el anterior, este índice varía más o menos por igual en el siglo XX que en el XXI, para los modelos de ENSEMBLES. Sin embargo, según la simulación de WRF-ECHAM5 que se analice, la variación es algo mayor en el siglo XX ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 16\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 18\%$ ) o en el

siglo XXI ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 19\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 15\%$ ). Aun así, la variación, por lo general, suele ser mayor en los modelos de ENSEMBLES que en el WRF-ECHAM5 (Anexo VI, Tabla 2).

#### 4.2.2.3 Precipitación total anual en los días muy lluviosos

La precipitación total anual en los días muy lluviosos proyectada por WRF-ECHAM5s1 varía entre 42.25 y 65.02 mm y entre 44.55 y 65.58 mm la proyectada por WRF-ECHAM5s3. Según el conjunto de modelos del ENSEMBLES la precipitación total anual en los días muy lluviosos está entre 29.03 y 71.35 mm entre 1971 y 2050 (Anexo IV, Tabla 9).

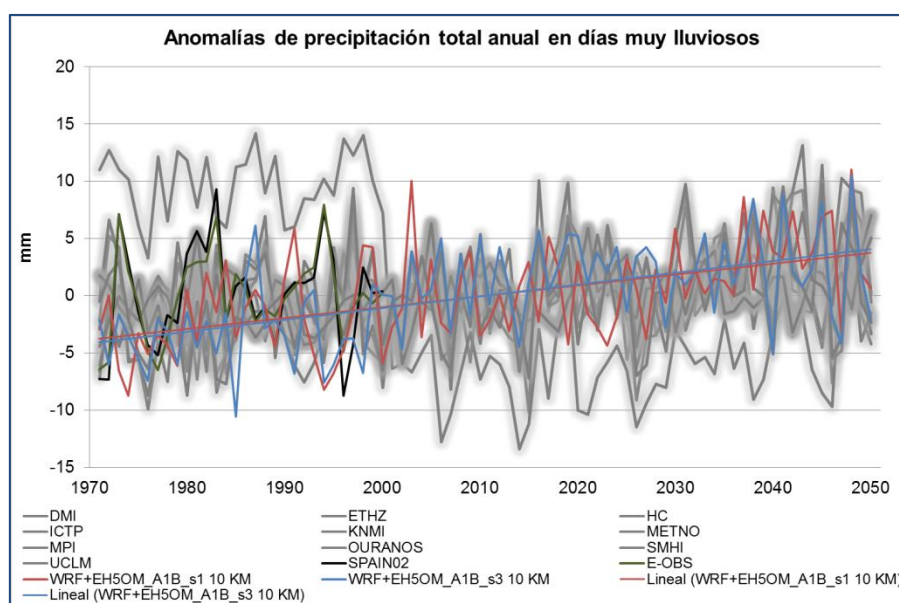


Figura 35. Anomalías de la precipitación total anual en los días muy lluviosos (R95PTOT) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

La figura 35 proyecta un claro aumento en la precipitación total anual en los días muy lluviosos de acuerdo a la mayoría de los modelos de ENSEMBLES (a excepción del HC), así como para ambas simulaciones del WRF-ECHAM5, que aumentan aproximadamente 8 mm entre 1971 y 2050.

En general, la variabilidad es similar si se comparan los modelos de ENSEMBLES, WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3. Ocurre lo mismo si se comparan los últimos años del siglo XX simulados ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 7\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 6\%$ ) y la primera mitad del siglo XXI ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 7\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 6\%$ ), se puede observar que la variación es prácticamente la misma a excepción de algún modelo de ENSEMBLES (ETHZ, HC y METNO) cuya variabilidad en la primera mitad del siglo XXI es mayor (Anexo VI, Tabla 2).

#### 4.2.2.4 Longitud de la racha húmeda

WRF-ECHAM5s1 se encuentra en un rango entre 7 y 12 días y WRF-ECHAM5s3 entre 7 y 14 días entre 1971 y 2050. Mientras que los modelos que conforman ENSEMBLES varían entre 8 y 19 días en todo el período (Anexo IV, Tabla 10).

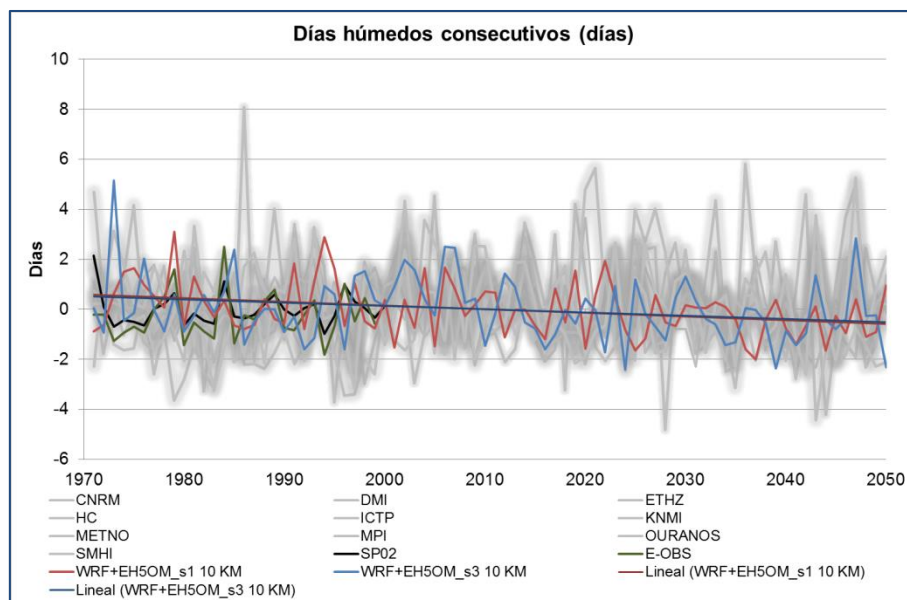


Figura 36. Anomalías de la longitud de la racha húmeda (CWD) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

En la figura 36 se representan las anomalías de la longitud de la racha húmeda donde se puede apreciar una disminución de la misma por parte del WRF-ECHAM5 y por parte de los modelos de ENSEMBLES. Así, tanto WRF-ECHAM5s1 como WRF-ECHAM5s3 proyectan una disminución aproximada de 1 día entre 1971 y 2050. Se puede observar que el modelo WRF-ECHAM5 varía menos que los modelos del proyecto ENSEMBLES en todo el período. No obstante, el WRF-ECHAM5 muestra mayor variabilidad en el siglo XX ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 12\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 15\%$ ), que en el XXI ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 11\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 14\%$ ), al contrario que la mayoría de los modelos de ENSEMBLES que varían más en la primera mitad del siglo XXI, excepto CNRM, DMI y SMHI (Anexo V, Tabla 2).

La figura 37 representa la diferencia estacional de la longitud de la racha húmeda, para (a) el período entre 1971-2000 simulado por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 y (b) la diferencia entre los períodos 2021-2050 y 1971-2000 por estaciones simulados por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3.



### Longitud de la racha húmeda por estaciones

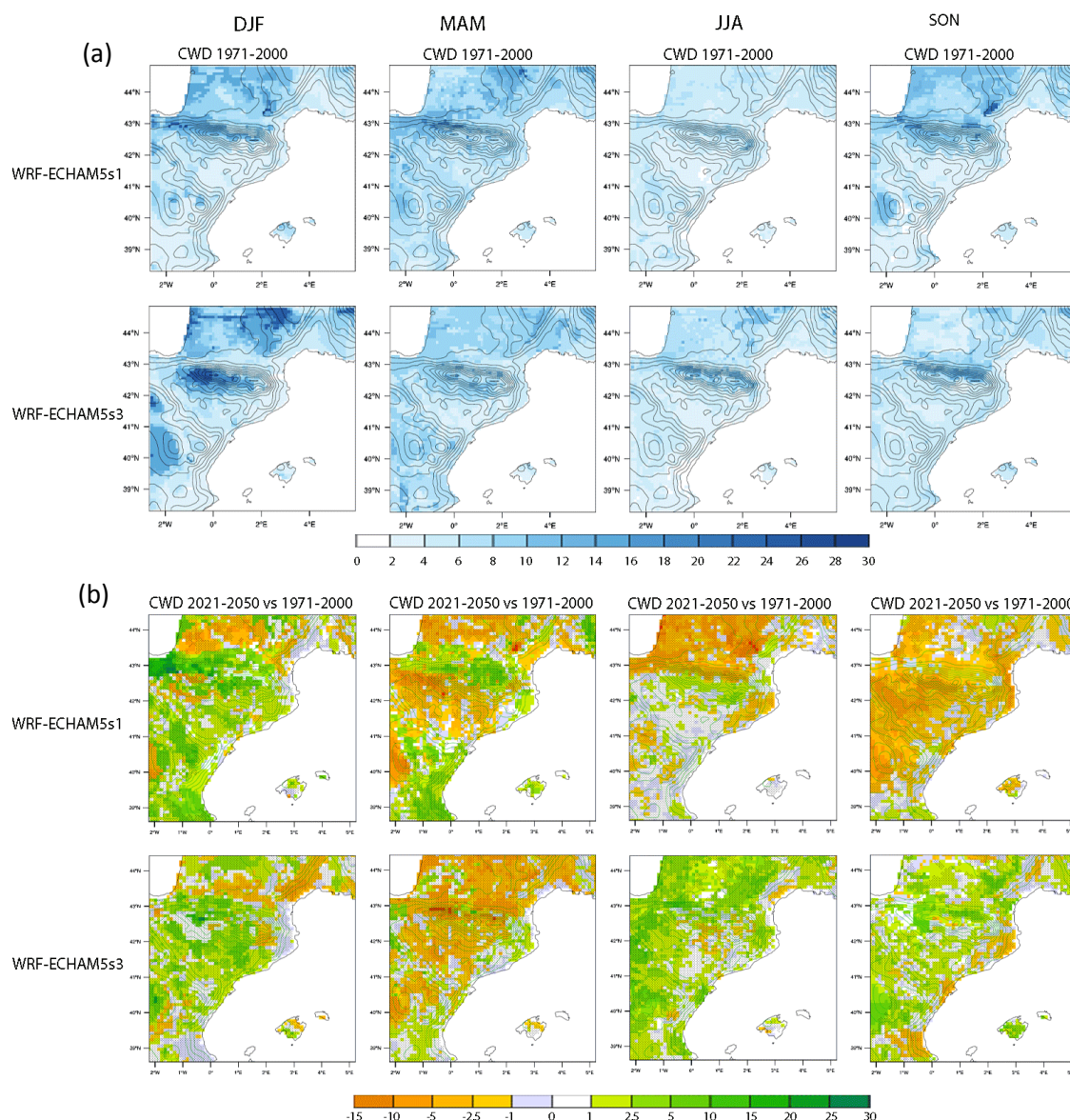


Figura 37. (a) Longitud de racha húmeda por simulada por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 entre 1971-2000, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON) y (b) Proyecciones de la longitud de la racha húmeda por estaciones entre 2021-2050 vs 1971-2000 por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)

En relación a las simulaciones estacionales realizadas por WRF-ECHAM5 para el período 1971-2000 se puede observar que la longitud de la racha húmeda es similar en todas las estaciones. Así, en invierno WRF-ECHAM5s1 tiene unos valores máximos que oscilan entre 10 y 12 días principalmente en el Pirineo. Por su parte, WRF-ECHAM5s3 la racha húmeda dura algo más que en WRF-ECHAM5s1, con valores entre 12 y 14 días en el Pirineo y en el Sistema Ibérico.

En primavera la racha húmeda disminuye con respecto al invierno, de tal manera que en WRF-ECHAM5s1 la racha más larga es de 10 días para la zona del Pirineo, mientras que en WRF-ECHAM5s3 el valor máximo es de 8 días en algunos puntos del Pirineo y en el Sistema Ibérico.

El verano es la estación con menor duración de la racha húmeda estando sus valores máximos, en WRF-ECHAM5s1, entre 4 y 6 días y entre 6 y 8 días en WRF-ECHAM5s3, en ambos casos estos valores se dan en algunos puntos del Pirineo.

El otoño es otra de las estaciones en las que la longitud de la racha húmeda tiene mayor duración, ya que ambas simulaciones proyectan una longitud máxima entre 10 y 12 días en la zona del Pirineo.

En cuanto a las proyecciones se puede apreciar que están asociadas a los valores dados por las simulaciones del siglo XX de WRF-ECHAM5. Así, se percibe un aumento generalizado de la longitud de la racha húmeda en toda la zona de estudio, aunque hay diferencias entre estaciones. En invierno WRF-ECHAM5s1 muestra un aumento entre 20 y 30 días en la zona de los Pirineos, y entre 5 y 10 días en la costa, algunos puntos del interior y Baleares. Sin embargo, en algunos puntos del Sistema Ibérico y del interior se proyecta una disminución máxima de 5 días. No obstante, WRF-ECHAM5s3 predice una disminución máxima de 5 días en la zona norte de los Pirineos y algunos puntos del interior, mientras que en la zona sur del Pirineo, puntos del Sistema Ibérico y del interior, así como de la costa y la zona norte de Baleares hay un aumento de entre 5 y 15 días.

En primavera, WRF-ECHAM5s1 proyecta un aumento máximo de 10 días en la zona del Pirineo, la mayor parte de la costa y Baleares. Aunque, en la zona del interior tiene lugar una disminución de hasta 15 días. Por otra parte, WRF-ECHAM5s3 predice un aumento máximo de 5 días en algunas zonas de la costa, mientras que en Los Pirineos y en el interior la longitud de la racha húmeda puede disminuir en 15 días.

En el caso del verano, WRF-ECHAM5s1 pronostica una disminución de entre 10 y 15 días en la mayor parte del Pirineo y en algunos puntos de la costa y el interior. Si bien muestra un probable aumento de entre 5 y 10 días en la parte sur del Pirineo. Contrariamente a lo que ocurre en WRF-ECHAM5s1, WRF-ECHAM5s3 predice un aumento en la racha húmeda de entre 10 y 15 días en casi toda la zona.

Para finalizar, en otoño WRF-ECHAM5s1 predice una disminución generalizada de alrededor de 15 días, excepto en algún punto de la costa valenciana donde puede aumentar 5 días como máximo. WRF-ECHAM5s3 por su parte, pronostica un aumento generalizado en toda la zona del interior y del Pirineo de entre 10 y 15 días, mientras que en la costa predice una disminución de, aproximadamente, 10 días.

La t-student verifica que en WRF-ECHAM5s3 hay diferencias significativas entre ambos periodos en toda la zona de estudio y la mayoría de estaciones, exceptuando el otoño donde en el Pirineo y alguna zona del interior no presentan diferencias significativas. Sin embargo, WRF-ECHAM5s1 en invierno muestra diferencias en toda la zona excepto en la costa. Al contrario de lo que ocurre en primavera donde se las diferencias se muestran en la costa, en el Pirineo y en algunas zonas del interior. En verano las diferencias son significativas en toda la zona de estudio. Por último, en otoño, al igual que WRF-ECHAM5s3, hay diferencias significativas en casi toda la zona, excepto el Pirineo y alguna zona del interior.

#### 4.2.2.5 Longitud de la racha seca

Los modelos de ENSEMBLES varían en un rango mucho mayor que WRF-ECHAM5 estando entre 12 y 101 días. Sin embargo, WRF-ECHAM5s1 varía entre 25 y 57 días y WRF-ECHAM5s3 entre 25 y 49 días (Anexo IV, Tabla 11).

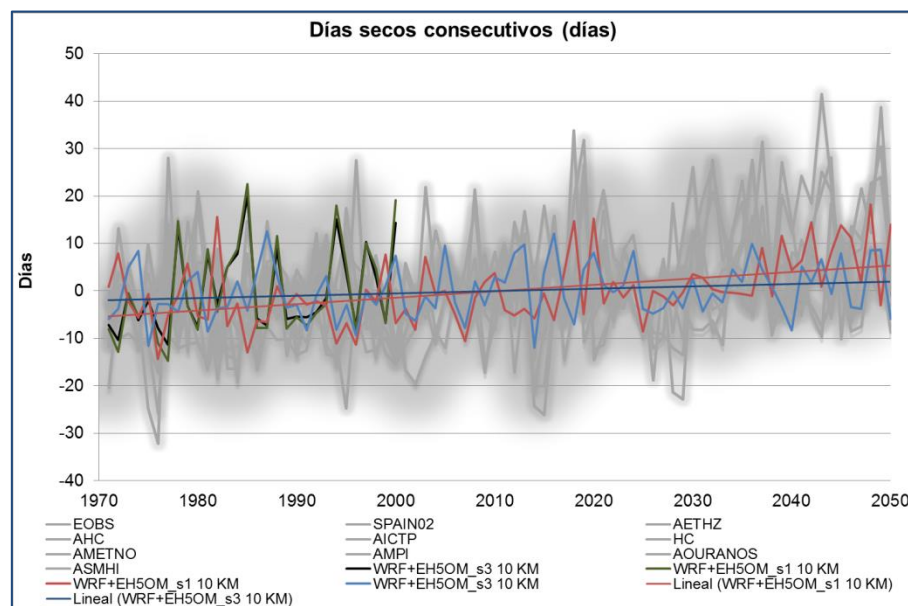


Figura 38. Anomalías de la longitud de la racha seca (CDD) entre 1971 y 2050 para el escenario A1B

En la figura 38 se representan las anomalías de la longitud de la racha seca mostrando un aumento por parte de todos los modelos, entre 1971 y 2050. De forma que WRF-ECHAM5s1 proyecta un aumento aproximado de 10 días en todo el período, mientras que en WRF-ECHAM5s3 la racha seca aumenta cerca de 3 días entre 1971 – 2050.

Al igual que otros índices de precipitación, la longitud de la racha seca varía más con respecto a los modelos de ENSEMBLES que cualquier simulación de WRF-ECHAM5. De la misma manera, WRF-ECHAM5 varía más en los últimos años del siglo XX ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 18\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 18\%$ ).

ECHAM5s3 = 16%) que en la primera mitad del siglo XXI ( $CV_{WRF-ECHAM5s1} = 17\%$ ,  $CV_{WRF-ECHAM5s3} = 15\%$ ), ocurriendo lo mismo en la mayoría de los modelos de ENSEMBLES, a excepción de CNRM, DMI, HC e ICTP (Anexo V, Tabla 2).

La figura 39 representa la diferencia estacional de la longitud de la racha seca, para (a) el período entre 1971-2000 simulado por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3, así como (b) para la diferencia entre los períodos entre 2021-2050 y 1971-2000 de WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3

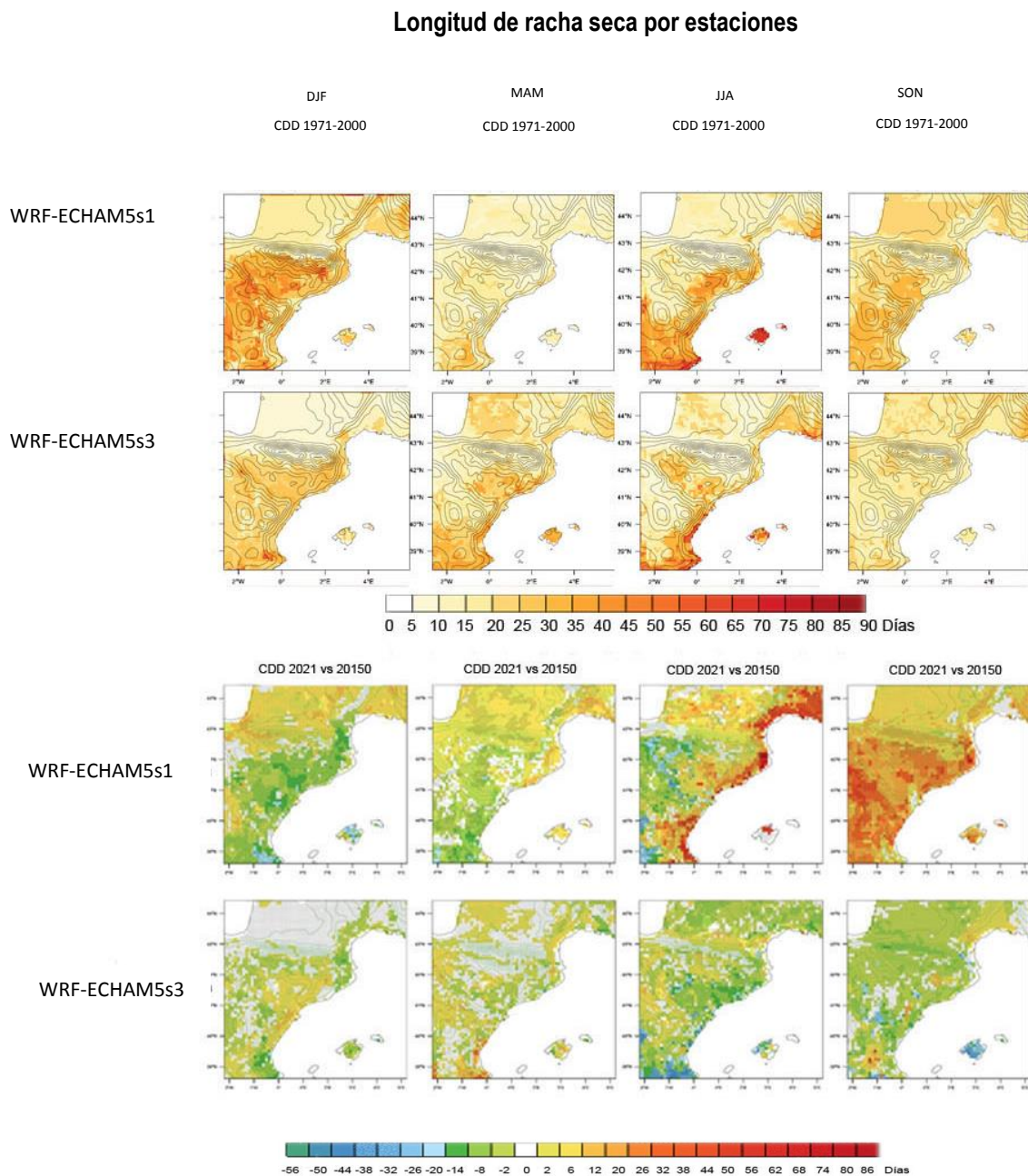


Figura 39. (a) Longitud de la racha seca simulada por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 entre 1971-2000, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON) y (b) proyecciones de la longitud de la racha seca entre 2021-2050 vs 1971-2000 realizadas por WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3, en invierno (DJF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON)



Con respecto a las simulaciones estacionales de WRF-ECHAM5 para el período de control, se puede apreciar que la racha seca es más larga en verano y en invierno. De modo que en invierno WRF-ECHAM5s1 tiene unos valores máximos entre 40 y 45 días en el Sistema Ibérico y parte de la Cuenca del Ebro. Mientras WRF-ECHAM5s3 da unos valores algo menores estando el máximo entre 25 y 30 días para la zona de la costa valenciana y algunos puntos de la Cuenca del Ebro. En primavera la longitud de la racha seca disminuye su duración hasta un máximo de 25 días según ambas simulaciones, para el Sistema Ibérico y algún punto de la Costa Valenciana. El verano es la estación con mayor duración de la racha seca, de manera que en ambas simulaciones de WRF-ECHAM5 la racha seca puede durar hasta 60 días en la costa valenciana y Baleares. Otoño es la estación donde la longitud de la racha seca dura menos, teniendo valores máximos en WRF-ECHAM5s1 de 2 días y de 15 días WRF-ECHAM5s3, en ambos casos ocurre en la costa valenciana y en la Cuenca del Ebro.

Por otra parte, las proyecciones muestran mayor variación en la zona de estudio. De forma que, en invierno WRF-ECHAM5s1 proyecta una disminución de hasta 20 días, especialmente en algún punto de la Costa Valenciana, aunque también en zonas del interior y Baleares. Mientras que en el Sistema Ibérico y los Pirineos la longitud de la racha seca aumenta un máximo de 12 días. WRF-ECHAM5s3 difiere de WRF-ECHAM5s1, de tal forma que en este caso, se da un aumento entre 6 y 12 días en la zona de la costa y parte de la Cuenca del Ebro. Sin embargo, predice disminuciones de hasta 14 días en Baleares, la Costa Brava, la costa valenciana y algún punto del Pirineo y el Sistema Ibérico.

En primavera, WRF-ECHAM5s1 proyecta una disminución en la costa valenciana y partes del Sistema Ibérico de entre 14 y 20 días y un aumento de entre 6 y 12 días en el Pirineo, la Costa Brava y partes del Interior. Por otro lado, WRF-ECHAM5s3 predice una pequeña disminución de hasta 8 días en algunos puntos de la costa valenciana. No obstante, se puede observar un aumento de hasta 32 días en algún punto de la costa valenciana, y de hasta 12 días en parte del Sistema Ibérico y la Cuenca del Ebro.

El verano es una de las estaciones donde más difieren las proyecciones entre ambas simulaciones de WRF-ECHAM5. De manera que WRF-ECHAM5s1 predice un aumento en toda la costa y en Baleares de hasta 50 días. Pero en el interior, especialmente en el Sistema Ibérico y puntos cercanos a la zona del Pirineo, se predicen disminuciones de hasta 32 días. Sin embargo, WRF-ECHAM5s3 pronostica un aumento máximo de 12 días en algunos puntos del

interior, pero en la mayor parte de la zona de estudio la longitud de la racha seca disminuye entre 2 y 32 días, dándose el máximo en la zona de Valencia y parte de Baleares.

Por último, en otoño, WRF-ECHAM5s1, da un aumento generalizado en la longitud de la racha seca entre 6 y 38 días. Los mayores aumentos se dan en el Sistema Ibérico y en algún punto de la Costa Brava. Por el contrario, WRF-ECHAM5s3 pronostica una disminución generalizada en toda la zona, de entre 8 y 26 días estando las máximas disminuciones en las Islas Baleares y algún punto del Sistema Ibérico. No obstante, se da un pequeño aumento de entre 6 y 20 días, en algún punto del Sistema Ibérico y de la Cuenca del Ebro.

Con respecto a la significancia, en WRF-ECHAM5s3 se dan diferencias significativas entre ambos períodos (2021-2050 y 1971-2000) en toda la zona de estudio y en todas las estaciones. Esto es diferente para WRF-ECHAM5s1, donde las zonas con diferencias significativas son mayores en invierno y en otoño, dándose diferencias en toda la zona de estudio. En verano, aunque hay diferencias en la mayor parte de la zona de estudio, estas no se dan en Los Pirineos ni en algunos puntos aislados del interior. Donde menos diferencias significativas hay, según la WRF-ECHAM5s1, es en primavera cuya significancia es mayor en zonas montañosas.

### 4.2.3 Síntesis de la proyección de los índices climáticos

La tabla 7 resume los resultados simulados por WRF-ECHAMs1 y WRF-ECHAMs3 para ambos periodos.

Tabla 7. Tabla de síntesis de la proyección de los índices climáticos

Indice	Tendencia	Variabilidad (SD o CV)
<b>05pTN</b>	Incremento del percentil 5 de la temperatura mínima de 3°C según WRF-ECHAMs1 y de 1.5°C según WRF-ECHAMs3	Baja variabilidad. Mayor variabilidad entre 2001-2050 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :0.88 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :0.99 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :0.82 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :0.69
<b>95pTX</b>	Incremento del percentil 95 de la temperatura máxima de 4.5°C según WRF-ECHAMs1 y de 2°C según WRF-ECHAMs3	Baja variabilidad. Mayor variabilidad entre 2001-2050 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :1.16 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :1.21 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :1.40 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :1.21
<b>ETR</b>	Ligero incremento del rango de temperaturas extremas de 0.2°C según WRF-ECHAMs3. Según WRF-ECHAMs1 permanece casi constante.	Baja variabilidad. Mayor variabilidad entre 2001-2050 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :2.04 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :2.10 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :2.10 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :2.26
<b>HWDI</b>	Incremento de las olas de calor de 4.5 días según WRF-ECHAMs1 y de 16 días según WRF-ECHAMs3	Gran variabilidad. Mayor variabilidad entre 1971-2000 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :11.54 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :10.35 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :11.45 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :9.32
<b>FD</b>	Disminución de los días de helada de 19 días según WRF-ECHAMs1 y de 17 días según WRF-ECHAMs3. Mayor disminución simulada de primavera a verano entre 1971-200 y entre 2001-2050 mayor disminución proyectada en verano.	Gran variabilidad. Mayor variabilidad entre 1971-2000 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :8.66 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :8.53 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :8.23 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :7.87
<b>TR</b>	Incremento de las noches tropicales de 15 días según WRF-ECHAMs1 y de 28 días según WRF-ECHAMs3. Mayor aumento simulado entre 1971 -2000 entre primavera y verano y entre 2001-2050 mayor aumento proyectado en verano.	Variabilidad baja. Mayor variabilidad entre 2001-2050 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :1.99 SD(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :2.38 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :6.62 SD(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :6.74
<b>RX1DAY</b>	Ligero aumento del máximo de precipitación diaria de 0.2 mm/día para ambas simulaciones.	Variabilidad alta. Mayor variabilidad entre 1971-2000 CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :17% CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :14% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :15% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :12%
<b>R20mm</b>	Disminución de los días de precipitación abundante de 0.5 días según WRF-ECHAMs1 y de 2 días según WRF-ECHAMs3.	Gran variabilidad. Variabilidad similar entre ambos periodos CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :16% CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :18% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs1</sub> :19% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAMs3</sub> :15%

Índice	Tendencia	Variabilidad (SD o CV)
<b>R95PTOT</b>	Incremento de la precipitación total anual en los días muy lluviosos de 8 mm para ambas simulaciones.	Baja variabilidad. Variación igual en ambos períodos CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :7% CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :6% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :7% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :6%
<b>CWD</b>	Disminución de la longitud de la racha húmeda de 1 día según ambas simulaciones. Mayor disminución de la racha húmeda entre 1971-200 en verano. Las proyecciones simulan un aumento generalizado en el pirineo en casi todas las estaciones, excepto en verano y una gran disminución en primavera en el interior.	Variabilidad alta. Mayor variabilidad entre 1971-200 CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :12% CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :15% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :11% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :14%
<b>CDD</b>	Aumento de la longitud de la racha seca de 10 días según WRF-ECHAM5s1 y de 3 días según WRF-ECHAMs3. Mayor longitud de racha seca simulada entre 1971-2000 en verano. Las proyecciones difieren entre sí, aunque simulan una disminución generalizada en el interior en todas las estaciones.	Variabilidad alta. Mayor variabilidad entre 1971-2000 CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :18% CV(1971-2000) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :16% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s1</sub> :17% CV(2001-2050) <sub>WRF-ECHAM5s3</sub> :15%

## 5. CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas del análisis de las simulaciones desarrolladas y analizadas en los apartados anteriores.

La evaluación del sistema de modelización ha dado resultados bastante satisfactorios tanto para los índices de precipitación como para los de temperatura. Las simulaciones de control se han realizado con el modelo WRF-ARW y se han forzado con el re-análisis ERA40 para el período de 1971-2000. Los resultados han sido comparados con las bases de datos observacionales: SP02 y E-OBS.

Se ha observado que los índices de temperatura, simulados por WRF-ERA40, se adaptan mejor a las observaciones puesto que tienen coeficientes de correlación por encima de 0.7. Todo lo contrario ocurre con los índices de precipitación en los que la mayoría poseen coeficientes entre 0.45 y 0.6, exceptuando la precipitación total anual en los días muy lluviosos o la longitud de las rachas húmeda y seca cuyos coeficientes están entre 0.7 y 0.9. **Tanto WRF-ERA40 como los resultados de los diversos modelos de ENSEMBLES representan mejor los índices de temperatura que los de precipitación**, como se puede comprobar con los estadísticos calculados (coeficientes de correlación, coeficientes de variación, desviación típica). Resultados similares obtuvieron Gonçalves et al., 2013 donde la precipitación presentaba correlaciones

temporales entre 0.5 y 0.8, mientras que la temperatura presentaba correlaciones mayores de 0.9.

Las simulaciones realizadas en el período de control (1971-2000) presentan mayor sesgo con respecto a SP02 que con respecto a E-OBS. De tal forma que **el modelo subestima la mayoría de los índices de temperatura en comparación con SP02 y con E-OBS**, a excepción del rango de temperaturas extremas y el percentil 5 de la temperatura mínima. Asimismo, **el modelo subestima la mayor parte de los índices de precipitación mostrados por SP02**, excepto la longitud de la racha húmeda. Mientras que **sobrestima ligeramente la mayoría de índices de precipitación representados por E-OBS**, excepto la longitud de la racha seca y el máximo de precipitación en 1 día que las subestima.

En cuanto a la temperatura no hay una clara tendencia, ya que subestima algunos índices como los días de helada o las olas de calor y sobrestima otros como las noches tropicales. Relacionado con la variación, índices como los días de helada o la duración de las olas de calor son los que más variación tienen de todos los índices de temperatura simulados durante el período de control, con valores de 10 y 9 días respectivamente.

Con respecto a **los índices de precipitación, todos tienen una gran variabilidad, entre 5.72 y 28 %**. Estos resultados son coherentes con otros estudios como el realizado por Domínguez et al. (2011) sobre los extremos de temperatura y precipitación sobre España simulados por un grupo de modelos regionales de alta resolución. Entre sus resultados concluyen que las cuencas Mediterráneas tienen un régimen de precipitación estacional muy marcado con una alta variabilidad y grandes acumulaciones en la precipitación y unas temperaturas más extremas, teniendo especial importancia las noches tropicales y las olas de calor. Asimismo, en su caso la mayoría de los modelos sobrestiman los índices de precipitación y subestiman los de temperatura.

Se han representado geográficamente y por estaciones cuatro índices: días de helada, noches tropicales, longitud de la racha húmeda y longitud de la racha seca. Así, **según SP02, E-OBS y WRF-ERA40, invierno es la estación con mayor número de días de helada entre 75 y 80 días**, localizándose los máximos en la zona del Pirineo y en algunos puntos del Sistema Ibérico. En cuanto a **las noches tropicales, solo se dan en verano con máximos de entre 25 y 55 días** en Baleares y en la Costa Valenciana principalmente. Con respecto a **la longitud de la racha húmeda, es mayor en primavera y en otoño, estando los máximos entre 10 y 16 días** en El Pirineo y en algunos puntos del Sistema Ibérico, fundamentalmente. En relación a la

**longitud de la racha seca los máximos valores se dan en invierno y en verano, pudiendo durar la racha seca entre 55 y 85 días** en el Sistema Ibérico y parte de la Cuenca del Ebro.

**Las proyecciones (2001-2050) desarrolladas con WRF-ARW y forzadas por el modelo ECHAM5, muestran la posibilidad de que los extremos de temperatura aumenten en los próximos años.** Como indican el aumento del percentil 5 de la temperatura mínima, el percentil 95 de temperatura máxima, así como la duración de las olas de calor, las noches tropicales y la disminución de los días de helada. Estacionalmente, **ambas simulaciones de WRF-ECHAM5, coinciden en que la disminución de los días de helada es máxima en verano**, al igual que ocurre en las simulaciones realizadas por WRF-ECHAM5 en el período de control, especialmente en la zona del Pirineo que disminuye hasta 10 días. Con respecto a **las noches tropicales aumentan más en verano y en otoño**, según WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3, especialmente en la costa y en Baleares, siendo coherentes con las simulaciones realizadas por el modelo en el siglo XX. Por otra parte, se ha observado que **en los índices de temperatura la variabilidad es mayor en los últimos años del siglo XX que en la primera mitad del siglo XXI**, como corrobora el valor de la desviación típica.

En cuanto a la precipitación, los índices no muestran una tendencia clara. Esto es debido a que la precipitación en la zona mediterránea es muy variable y menos clara y coherente que la temperatura (Boberg et al., 2010; Barrera-Escoda et al., 2013). Resultados similares obtuvieron Petisco de lara et al., (2007) estudiando los extremos de temperatura y precipitación para el siglo XXI en España, donde demostraron que las variaciones para los índices de precipitación eran menos claras que las obtenidas en los índices de temperatura.

**De acuerdo con WRF-ECHAM5 los extremos de precipitación aumentarán su frecuencia e intensidad y disminuirán su persistencia para el horizonte 2050**, como corroboran el aumento del máximo de precipitación en 1 día, de la precipitación total anual en los días muy lluviosos de la longitud de la racha seca, así como, la disminución la longitud de la racha húmeda. Estacionalmente, **la longitud de la racha húmeda disminuye más en primavera**, pudiendo disminuir hasta 15 días en la Cuenca del Ebro, parte del Sistema Ibérico y en los Pirineos. Por el contrario, **invierno es la estación donde más aumenta** la longitud de la racha húmeda dándose un máximo de 20 días en el interior y en Los Pirineos. En ambas estaciones la longitud de la racha húmeda aumentará ligeramente en la zona de la costa.

Estos resultados son coherentes en relación a las simulaciones realizadas con WRF-ECHAM5s1 y WRF-ECHAM5s3 en el período entre 1971 y 2000, donde se muestra que los máximos valores

se dan en invierno. Con respecto a **la longitud de la racha seca**, tanto WRF-ECHAM5s1 como WRF-ECHAM5s3 predicen **un aumento en invierno y en primavera en puntos del Pirineo y de la Cuenca del Ebro** de entre 2 y 12 días, **y una disminución máxima de 14 días en algunos puntos de la costa y parte del Sistema Ibérico**. Asociados a los resultados de las proyecciones están las simulaciones realizadas por WRF-ECHAM5 para el período de control, pudiéndose observar que en la mayoría de los casos donde menos dura la racha seca mayor aumento proyecta. Al igual que en los índices de temperatura, en los de precipitación se calculó el coeficiente de variación, para todo el período, para los últimos años del siglo XX y para la primera mitad del siglo XXI, con el fin de estudiar su variabilidad. En este caso no hay una clara diferencia entre ambos períodos, siendo la **variabilidad más o menos igual en el siglo XX que en el XXI**.

Adicionalmente, se incorporó, a los índices representados geográficamente, el cálculo del test estadístico t-student con el fin de ver si había diferencias significativas entre los períodos 2021-2050 y 1971-2000. De tal manera, que en los días de helada se observa que hay diferencias significativas en la costa. Asimismo, tanto la longitud de la racha húmeda como la longitud de la racha seca las diferencias son significativas para toda la zona de estudio.

Para concluir, **este estudio corrobora que los modelos de regionalización climática a alta resolución permiten representar los patrones espaciales y la evolución temporal presente y futura de los extremos de temperatura y precipitación**, proporcionando información suficiente para proponer medidas de minimización y mitigación. Por ello hay que tomar en consideración las **proyecciones con respecto al aumento generalizado de los extremos de temperatura**. Asimismo, hay que tener en cuenta el probable aumento en la frecuencia de la precipitación y la posible disminución en la intensidad de la misma, pudiendo tener como consecuencia una disminución de la precipitación abundante y, por tanto, un **aumento en la longitud de la racha seca**. Todo ello tendrá efecto en los recursos hídricos, en la flora y la fauna, así como en la salud de las personas.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Agència Catalana de l'Aigua. (2005). L'Agència i la sequera. En *Memòria 2005* (pàgs. 24-39). Agència Catalana de l'Aigua.
- Agència Catalana de l'Aigua. (2008). Aigua i canvi global. En *Memòria 2008* (pàgs. 57-73). Agència Catalana de l'Aigua.
- Altava-Ortiz. (2010). *Caracterització i monitoratge de les sequeres a Catalunya i nord del País Valencià. Càlcul d'escenaris climàtics per al segle XXI, Tesis Doctoral, Publicació Interna, Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona 2966 pp.*
- Baldi, M., Giovanni, D., Giampiero, M., Massimiliano, P., & Cesarone, F. (2006). Heat waves in the Mediterranean: a local feature or a larger-scale effect? *International Journal of Climatology*, 26, pp.1477-1487,doi: 10.1002/joc.1389.
- Barrera-Escoda, A., Gonçalves, M., Guerreiro, D., Cunillera, J., & Baldasano, J.M. (2013). Projections of temperature and precipitation extremes in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050). *Climatic Change*, 1-16.
- Benestad, R., Hanssen-Bauer, I., & Chen, D. (2008). Empirical-Statistical Downscaling. En E. Rasmus Benestad, I. Hanssen-Bauer, & D. Chen, *Empirical-Statistical Downscaling* (pàgs. 1-21). World Scientific Publishing Company.
- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W., & Christensen, J. (2010). Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. *Climate Dynamics*, 35, 1509-1520, doi: 10.1007/s00382-009-0683-8.
- Cardoso, R.M., Soares, P.M.M., Miranda, P.M.A and Belo-Pereira, M. (2013), WRF high resolution simulation of Iberian mean and extreme precipitation climate. *International Journal of Climatology*, 33:2591-2608. doi: 10.1002/joc.3616
- Lo, J.C.-F., Z.-L. Yang, and R.A. Pielke Sr. (2008), Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model, *Journal of Geophysical Research*, 113, D09112, doi:10.1029/2007JD009216.
- Cunillera, J. (2009): "Indicadors climàtics per al seguiment". A Prat, N. i A. Manzano (eds.): Aigua i canvi climàtic. Diagnosi dels impactes previstos a Catalunya. 3r Conveni de l'Agència Catalana de l'Aigua Fundació Nova Cultura de l'Aigua. Agència Catalana de l'Aigua, Departament de Medi Ambient i Habitatge, Generalitat de Catalunya, Barcelona, Espanya, pp. 53-62.
- Cunillera i Grañó, J., Baldasano, J., Barrera Escoda, A., Gonçalves Ageitos, M., & Guerreiro Pérez, D. (2013). *Generació d'escenaris climàtics amb alta resolució a Catalunya. Projecte ESCAT*. Barcelona.
- Domínguez, M., Romera, R., Sánchez, E., Fita, L., Fernández, J., Jiménez-Guerrero, P., y otros. (2013). Precipitation and temperature extremes under present climate over Spain from a set of high resolution RCMs. *Climate Research*.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2007). IFS Documentation - Cy31r1 .



- Fernández, J., Fita, L., García-Díez, M., Montávez, J., Jiménez-Guerrero, P., Domínguez, M., y otros. (2012). Escenarios PNACC 2012: Resultados de regionalización dinámica.
- Framework Convention on Climate Change. (2013). Further Advancing the Durban Platform. Varsovia.
- Gilbert, P. (2004). *ENSEMBLES*. Recuperado el 2013, de ENSEMBLES: <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>
- Giorgi, F. (2008). Regionalization of climate change information for impact assessment and adaptation. *WMO Bulletin* 57, 86 - 92.
- Giorgi, F., & Mearns O, L. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Review of Geophysics*, 29(2), 191 - 216, doi:10.1029/90RG02636.
- Giorgi, F., Jones, C., & Ghassem R., A. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin* 58, 175 - 183.
- Gonçalves, M., Barrera-Escoda, A., Guerreiro, D., Baldasano, J., & Cunillera, J. (2013). Assessment of temperature and precipitation trends in the North Western Mediterranean Basin by dynamical downscaling of climate scenarios at high resolution (1971-2050). *Climatic Change*, 122, pp 243-256, doi: 10.1007/s10584-013-0994-y.
- Goose, H., Barriat, P., Lefebvre, w., Loutre, M., & Zunz, V. (2008). *Introduction to climate dynamics and climate modeling online textbook*. disponible en: <http://www.climate.be/textbook>
- Goubanova, K., & Li, L. (2006). Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulaciones. *Global and planetary change*, 57, 27-42, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.012.
- Haylock, M., Hofstra, N., Klein Tank, A., Klok, E., Jones, P., & New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of geophysical research*.
- Heikkilä, U., Sndvik, A., & Sorterberg, A. (2011). Dynamical Downscaling of ERA-40 in complex terrain using WRF regional climate model. *Climate dynamics*, 37, 1551-1564, doi:10.1007/s00382-010-0928-6.
- Herrera García, S. (2011). *Tesis doctoral. Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España*. Santander.
- Herrera, S., Gutiérrez, J., Ancell, R., Pons, M., Frías, M., & Fernández, J. (2010). Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02). *International Journal of Climatology*.
- Houghton, J. (2005). *Global warming*. Exeter. Institute of Physics Publishing.
- Instituto Geológico y Minero de España. (2010). *TOPOIBERIA*. Recuperado el Junio de 2013, de TOPOIBERIA: <http://www.igme.es/internet/Topolberia/introduccion.html>
- IPCC. (1997). *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el segundo informe de evaluación del IPCC*. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>
- IPCC. (2000). *Informe Especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>
- IPCC. (2001). *Third Assessment Report: Climate Change 2001 (TAR)*. Cambridge: Cambridge University Press. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>

- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis*. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>
- IPCC. (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis: summary for policymakers*. disponible en: <http://www.ipcc.ch/>.
- Jorba, O., Jiménez-Guerrero, P., & Baldasano, J. M. (2008). Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. *9th annual WRF's ushers Workshop*. Boulder, CO, USA.
- Klein Tank, A., Zwiers, F., & Zhang, X. (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*.
- Marsland, S., Haak, H., Jungclaus, J., Latif, M., & Röske, F. (2003). The Max-Planck-Institute global ocean/seaice model with orthogonal curvilinear coordinates. *Ocean Modelling* 5 (2), 91-127.
- Martín Vide, J., & Llasat Botija, M. (2000). Las precipitaciones torrenciales en Cataluña. *Serie Geográfica*, 17-26.
- Mercader, J., Codina, B., Sairouni, A., & Cunillera, J. (2010). Results of the meteorological model WRF-ARW over Catalonia using different parametrizations. *Tethys*, 7, pp. 75-86, doi: 10.3369/tethys.2010.7.07.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., y otros. (2000). *Emissions Scenarios 2000-Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (SRES-IEEE)*. Cambridge: Cambridge University Press. disponible en: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>
- OMM. (2007). *Cambio climático y desertificación*.
- Petisco de Lara, S., Ramos Calzado, P., & Martín Herreros, J. (2007). Extremos de temperaturas y precipitación para el siglo XXI en España. 197-205. disponible en: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Extremos-temperaturas-precipitaci%C3%B3n-Espa%C3%B1a.pdf>
- Roeckner, E. (2005a). *IPCC MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 20C3M\_all run no 1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg, Alemania, CERA-DB "EH5-T63L31\_OM\_20C3M\_1\_6H"*.
- Roeckner, E. (2005b). *IPCC MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 20C3M run no.3:atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate. Hamburg, Alemania, Cera-DB "EH5-T63L31\_OM\_20C3M\_3\_6H"*.
- Roeckner, E., Bäuml, G., Bonaventura, L., Brokopf, R., Esch, M., Giorgetta, M., y otros. (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part I*. Hamburgo.
- Roeckner, E., Lautenschlager, M., & Schneider, H. (2006b). *IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA1B run no.3: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center, Hamburg, Alemania*.
- Roeckner, E., Lautenschlager, M., & Schneider, H. (2006a). *IPCC-AR4 MPI-ECHAM5\_T63L31 MPI-OM\_GR1.5L40 SRESA1B run no.1: atmosphere 6 HOUR values MPImet/MaDGermany. World Data Center for Climate, Hamburg. Alemania*.

- Sánchez, E., Gallardo, C., Gaertner, M., Arribas, A., & Castro, M. (2004). Future climate extreme events in the mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach. *Global and Planetary Change*, 163-180.
- Santamaría Antonio, J. (2010). Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(1), 149-173.
- Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). (2013). Butlletí climàtic de l'any 2012.
- Sillmann, J., & Roeckner, E. (2008). Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic change*, 86, 83-104. doi: 10.1007/s10584-007-9308-6.
- Trenberth, K. (2008). Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas. *Boletín de la OMM*, 57(1), 17-21.
- Uppala, S. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society* 131, pp. 2961-3012, doi: doi: 10.1256/qj.04.176.
- Van der Linden, P., Mitchel, J., & Gilbert, P. (2009). *ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal an centennial timescales*. Exeter.
- Van Ulden, A., & Van Oldenborgh, G. (2006). Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulation and their importance for climate change in Central Europe. *Atmospheric Chemistry an Physics*, 6, pp.863-881, doi: 10.5194/acp-6-863-2006. Disponible a: <http://www.atmos-chem-phys.net/6/863/2006/>.
- World Meteorological Organization (WMO). (2013). *2001-2010. A decade of climate extremes*.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., y otros. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wires Climate Change*, 2, 851-870, doi: 10.1002/wcc.147.